



# **Universidad de Málaga**

**Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación  
Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación**

## **Tesis Doctoral**

**Metodología para la Caracterización del Mecanizado  
de Aleaciones Ligeras de uso Aeronáutico  
a través del Análisis de la Viruta**

**Yezika Sánchez Hernández**

**Directores de Tesis**

**Dr. D. Lorenzo Sevilla Hurtado**

**Dr. D. Mariano Marcos Bárcena**


**Málaga, 2017**





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Yezika Sánchez Hernández

 <http://orcid.org/0000-0001-5017-5501>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**Universidad de Málaga**

**Tesis Doctoral**

**Metodología para la Caracterización del  
Mecanizado de Aleaciones Ligeras de uso  
Aeronáutico a través del Análisis de la Viruta**

**Yezika Sánchez Hernández**

Directores de Tesis

**Dr. D. Lorenzo Sevilla Hurtado**

**Dr. D. Mariano Marcos Bárcena**



**Málaga, 2017**





**Tesis Doctoral**

**Metodología para la Caracterización del  
Mecanizado de Aleaciones Ligeras de uso  
Aeronáutico a través del Análisis de la Viruta**

**Yezika Sánchez Hernández**

Ingeniería de Fabricación



ÁREA DE INGENIERÍA DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, DE MATERIALES Y FABRICACIÓN

**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**

Para la obtención del Grado de Doctor  
por la Universidad de Málaga

**Málaga, 2017**





El Dr. D. **Lorenzo Sevilla Hurtado**, Profesor Titular de Universidad y Director del Departamento de Ingeniería Civil, Materiales y Fabricación de la Universidad de Málaga y el Dr. D. **Mariano Marcos Bárcena**, Profesor Titular de Universidad en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial de la Universidad de Cádiz,

#### INFORMAN

Que Dña. **Yezika Sánchez Hernández**, Máster en Ingeniería de Fabricación, ha realizado bajo nuestra dirección la Tesis Doctoral titulada: **METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MECANIZADO DE ALEACIONES LIGERAS DE USO AERONÁUTICO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE LA VIRUTA**, que se recoge en la siguiente memoria, cumpliendo todos los requisitos legales para optar al grado de DOCTORA, por lo que autorizamos su lectura y defensa pública.

Y para que así conste y tenga los efectos oportunos, firmamos el presente certificado.

En Málaga, a 10 de enero de 2017



Fdo. D.: Lorenzo Sevilla Hurtado



Fdo. D.: Mariano Marcos Bárcena





*"Impossible" es solo una palabra  
que usan los hombres débiles  
para vivir fácilmente  
en el mundo que se les dio,  
sin atreverse a explorar el poder  
que tienen para cambiarlo.  
"Impossible" no es un hecho,  
es una opinión.  
"Impossible" no es una declaración,  
es un reto.  
"Impossible" es potencial.  
"Impossible" es temporal.  
"Impossible" no es nada.*

*"Impossible" is just a big word  
thrown around by small men who  
find it easier to live in the world.  
they've been given that to explore  
the power they have to change it.  
"Impossible" is not a fact.  
It's an opinion.  
"Impossible" is not a declaration.  
It's a dare.  
"Impossible" is potential.  
"Impossible" is temporary.  
"Impossible" is nothing.*

*Muhammad Ali  
(1942-2016)*





## AGRADECIMIENTOS

*Esta sección deja constancia de mi más sincero sentir. Estas líneas están dirigidas principalmente a mis padres y hermanas, por su amor, ánimos y entrega incondicional en cada fase de mi vida. Y a todas mis amistades más cercanas que siguieron muy de cerca cada pasos durante el desarrollo de esta investigación. A ti Fran, por ser mi gran pilar en todo momento y por creer en mí más que nunca; respaldando mis decisiones y esfuerzos para lograr un eslabón más en mi vida profesional como personal. Gracias por estar ahí en mis etapas frustrantes como existenciales; no sabes lo mucho que valoro cada fase. Y finalmente, a mi pequeñín Gael, que sin pensarlo has sido la clave motora (el detonante principal) que me impulso a cumplir este proyecto: permitirme iniciar otro aun más complejo, el ser tu madre. Y, de forma muy personal deseo expresar que cada momento vivido durante el desarrollo de esta tesis fueron simplemente únicos e irrepetibles, los cuales me dieron la oportunidad de corregir y reafirmar mi persona. Y, sobre todo que permitió enriquecer más mi temperamento profesional.*

*Por otro lado, este párrafo, está dedicado con todo mi aprecio y respeto, de forma especial, a aquellos profesores que influenciaron directamente en mí. Mis directores de tesis, Lorenzo Sevilla y Mariano Marcos, por dedicar su confianza y sus múltiples consejos, de los cuales aprendí que esta investigación no sólo concluye en la interpretación de teorías científicas sino también el haber encontrado en mí el potencial para llevarla a cabo. Infinitas gracias por aportar sus experiencias y sugerencias, las cuales hicieron posible que este estudio concluya con éxito. Dentro de estas líneas hago hincapié el gran apoyo del catedrático Moisés Hinojosa, por su tiempo, confianza y la oportunidad de trabajar en equipo en líneas paralelas a este proyecto.*

*Finalmente, deseo agradecer de todo corazón a mis compañeros del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación y del Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación de la Universidad de Málaga; en especial a Manuel y Francisco Javier, por sus incontables momentos dedicados a responder o simplemente escuchar mis dudas existenciales para llevar a cabo con éxito la propuesta experimental; bajo estas mismas líneas agradecer sus ánimos y disposición a María José, Francisco y María Jesús. Dentro de este marco, es importante mencionar a Germán Castillo por su confianza y dedicación a mis inquietudes por conocer más sobre el tema de adquisición de señales eléctrica, que de forma indirecta hizo posible llevar un tema de innovar mediante una técnica que jamás pensé lograr; gracias a ello, esta investigación lleva un sello más original.*

*Por último, pero de gran importancia, deseo expresar mi agradecimiento de todo corazón al Grupo de Investigación del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz, principalmente a Moisés Batista por ser uno de los principales propulsores que me llevaron a dar este gran paso académico y permitirme coincidir con esta línea investigadora. Y, claro, al gran equipo humano-gaditano, que gracias a su peculiar carisma y humanismo siempre me han hecho sentir como en casa; Jorge, Álvaro, Pedro, Dani, Mainé, Juanma, Miguel, Severo y Fran; un verdadero grupo que jamás olvidaré.*



## RESUMEN

Esta investigación se centra en la caracterizar el comportamiento de las aleaciones ligeras durante el proceso de torneado (utilizando piezas cilíndricas con corte geométrico cercano a la ortogonal); particularmente en la aleación *Ti6Al4V* a través del estudio comparativo de diversas metodologías permitiendo evaluar los aspectos geométricos de la viruta en correlación con ciertos parámetros de corte como velocidad de corte  $V_c$ , velocidad de alimentación  $f$  y profundidad de corte  $ap$ . La intención de estos experimentos es promover el análisis de virutas como un posible indicador que ayuda a comprender el proceso de mecanizado e influir significativamente en las propiedades del material de trabajo, la herramienta y los parámetros de corte. Y, a su vez correlacionar el análisis de las fuerzas de corte así como también el desgaste de la herramienta de corte.

**Palabras clave:** Aleaciones ligeras, Corte Ortogonal, Mecanizado, Fuerzas de corte, Morfología de la Viruta, Mecanismos de desgaste de la herramienta de corte.



## **ABSTRACT**

This investigation focused on understanding by empirical analysis of machining of lightweight alloys during turning process (using cylindrical parts with geometry cutting close to orthogonal - carried out mostly in research laboratories in order to better understand this complex process) through the comparative study of various methodologies to characterize of morphology chip correlated to the influence of the cutting parameters as cutting speed  $V_c$ , feed rate  $f$  and depth of cutting  $ap$ . The intention of these experiments is promote chip analysis as a possible indicator that help to understand the machining process and influence significantly on the properties of the work material and the same time to evaluated the machinability of material through cutting forces, as well as the tool wear in relationship with chip morphology.

**Key words:** Light alloys, Machining process, Orthogonal cutting, Cutting force, Chip morphology and Wear mechanisms.



# Índice General

---

*Metodología para la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras de uso  
aeronáutico a través del análisis de la viruta*

---





## Capítulo 1: Generalidades

1.1	Ámbito de la Tesis Doctoral.....	1.1
1.2	Objetivo de la Tesis Doctoral.....	1.2
1.3	Estructura de la Tesis Doctoral.....	1.3

## Capítulo 2: Caracterización morfológica de la viruta en el proceso de mecanizado. Una aproximación al Estado del Arte.

2.1	Introducción.....	2.1
2.2	Desarrollo tecnológico en los procesos de fabricación. Mecanizado por arranque de viruta.....	2.2
2.3	Morfología de la viruta durante el mecanizado .....	2.4
2.4	Mecanismos de formación de la viruta .....	2.9
2.5	Tipos de la viruta producida durante el mecanizado.....	2.12
2.6	Geometría de la viruta en base al tipo de corte .....	2.16
2.7	Aspectos geométricos de la viruta.....	2.17
2.7.1	Altura de cresta de la viruta, $h_c$ .....	2.18
2.7.2	Altura de valle de la viruta, $h_v$ .....	2.18
2.7.3	Sección de la viruta, $S$ .....	2.19
2.7.4	Ángulo de cizalladura, $\phi$ .....	2.20
2.7.5	Área de la viruta, $S_v$ .....	2.21
2.7.6	Anchura de la viruta, $b_v$ .....	2.21
2.7.7	Factor de recalcado o acortamiento de la viruta, $\zeta$ .....	2.21
2.7.8	Grado de segmentación, $G_s$ .....	2.22
2.8	Factores de influencia en la viruta .....	2.22
2.8.1	Propiedades del material a mecanizar.....	2.22
2.8.2	Parámetros tecnológicos de corte .....	2.23
2.8.2.1	Avance, $f$ .....	2.24
2.8.2.2	Velocidad de corte, $V_c$ .....	2.24
2.8.2.3	Profundidad de corte, $p$ o $ap$ .....	2.25
2.8.3	Herramienta de corte.....	2.25
2.8.4	Desgaste y vida de la herramienta .....	2.27
2.8.5	Maquinaria y operación de trabajo.....	2.30

2.9	Condiciones de corte vinculadas con el medio ambiente .....	2.30
2.10	Transferencia de calor durante el mecanizado .....	2.32
2.11	Correlación de las fuerzas en el mecanizado .....	2.34
2.12	Técnicas de monitorización aplicables al mecanizado.....	2.36
2.12.1	Monitorización del proceso .....	2.37
2.12.2	Monitorización de la herramienta de corte .....	2.38
2.12.3	Monitorización de la pieza de trabajo .....	2.40
2.13	Modelos paramétricos relacionados con el mecanizado.....	2.41
2.13.1	Modelos relacionados con aspectos geométricos de la viruta .....	2.42
2.13.2	Modelos relacionados con la herramienta de corte.....	2.43
2.13.3	Modelos relacionados con las fuerzas de corte .....	2.44
2.14	Conclusiones.....	2.45
2.15	Referencias.....	2.46

### Capítulo 3: Estado del Arte: Mecanizado de Aleaciones Ligeras

3.1	Introducción.....	3.1
3.2	Aleaciones ligeras como material estratégico en el sector industrial .....	3.2
3.3	El uso del titanio en el sector industrial.....	3.2
3.3.1	Reseña bibliográfica sobre los orígenes del titanio .....	3.2
3.3.2	Introducción del titanio al sector industrial .....	3.3
3.3.3	Aplicaciones industriales del titanio .....	3.6
3.3.4	El titanio en el sector de transporte aéreo .....	3.8
3.4	Propiedades del Titanio.....	3.10
3.5	Clasificación de las aleaciones de Titanio .....	3.12
3.6	Aleación <i>Ti6Al4V</i> (UNS R56400).....	3.14
3.6.1	Características generales de la aleación <i>Ti6Al4V</i> (UNS R56400).....	3.14
3.7	Mecanizado de la aleación <i>Ti6Al4V</i> (UNS R56400) .....	3.15
3.7.1	Análisis morfológico de la viruta durante el mecanizado de <i>Ti6Al4V</i> .....	3.15
3.7.2	Análisis de las fuerzas de corte durante el mecanizado de <i>Ti6Al4V</i> .....	3.19
3.7.3	Desgaste de la herramienta de corte durante en el mecanizado de <i>Ti6Al4V</i> .....	3.20
3.8	Conclusiones.....	3.21
	Referencias.....	3.22

## Capítulo 4: Metodología Experimental

4.1	Introducción.....	4.1
4.2	Metodología .....	4.2
4.3	Análisis de la aleación establecida para los ensayos .....	4.4
4.4	Planificación de los ensayos .....	4.6
4.4.1	Determinación de las variables de estudio .....	4.6
4.4.1.1	Selección del proceso.....	4.8
4.4.1.2	Parámetros tecnológicos de corte.....	4.9
4.4.1.3	Condiciones del mecanizado .....	4.9
4.4.1.4	Herramienta de trabajo .....	4.10
4.4.2	Tipo de ensayo.....	4.12
4.4.3	Preparación del material.....	4.13
4.4.3.1	Suministro y adaptación del material de trabajo.....	4.14
4.4.3.2	Diseño de la preforma .....	4.14
4.4.3.3	Codificación de preforma.....	4.19
4.4.4	Diseño y ejecución del programa para adquisición de fuerzas de corte.....	4.20
4.5	Ejecución de ensayos experimentales.....	4.25
4.5.1	Codificación de ensayos.....	4.25
4.5.2	Protocolo de ensayo.....	4.27
4.5.3	Selección y trazabilidad de la muestra de estudio .....	4.28
4.6	Análisis de los resultados basado en técnicas de monitorización .....	4.30
4.6.1	Monitorización <i>On-Line</i> .....	4.31
4.6.2	Monitorización <i>Off-Line</i> .....	4.31
4.7	Análisis metalográficos.....	4.32
4.7.1	Estudios microscópicos .....	4.32
4.7.1.1	Estudios microscópicos a fragmentos de viruta .....	4.33
4.7.1.2	Tratamiento de imagen mediante el software ImageJ.....	4.36
4.7.1.3	Estudios microscópicos en la herramienta de corte .....	4.38
4.7.2	Estudios macroscópicos.....	4.38
4.8	Caracterización previa de resultados.....	4.39
4.8.1	Morfología de la viruta .....	4.39

4.8.2	Herramienta de corte.....	4.42
4.8.3	Fuerzas de corte .....	4.42
4.9	Conclusiones.....	4.43
	Referencias .....	4.45

## Capítulo 5: Interpretación y Discusión de los Resultados

5.1	Introducción.....	5.1
5.2	Evaluación y caracterización del material.....	5.2
5.3	Evaluación geométrica de la viruta con respecto a $V_c$ y $f$ .....	5.3
5.3.1	Aspectos físicos de la viruta (Vista microscópica y macroscópica).....	5.4
5.3.2	Análisis geométrico de la viruta (Vista longitudinal).....	5.9
5.3.3	Análisis geométrico de la viruta (Vista transversal).....	5.14
5.4	Evaluación de fuerzas con respecto a $V_c$ y $f$ .....	5.19
5.5	Evaluación del desgaste de la herramienta de corte con respecto a $V_c$ y $f$ .....	5.27
5.5.1	Análisis del efecto del desgaste sobre las fuerzas de corte.....	5.32
5.6	Modelos paramétricos para el mecanizado de aleaciones ligeras .....	5.33
5.6.1	Modelos paramétricos relacionados con la geometría de la viruta.....	5.34
5.6.2	Modelos paramétricos relacionados con las fuerzas de corte.....	5.37
5.6.3	Modelos paramétricos relacionados con el desgaste de la herramienta .....	5.38
5.7	Conclusiones.....	5.39
	Referencias.....	5.41

## Capítulo 6: Conclusiones y Líneas futuras

6.1	Introducción.....	6.1
6.2	Conclusiones.....	6.1
6.3	Líneas futuras .....	6.7

## Thesis English Summary

E.1	Introduction .....	E.1
E.2	The State of the Art: Chip morphology and machining process (light alloys).....	E.2
E.3	Experimental .....	E.3
E.4	Results and discussion.....	E.7
E.4.1	Chip formation analysis .....	E.8

E.4.2 Tool wear analysis.....	E.14
E.4.3 Cutting forces analysis .....	E.18
E.5 Other technical analysis .....	E.19
E.5.1 Tool wear evolutions versus the cutting forces .....	E.19
E.6 Parametric Models .....	E.20
E.6.1 Parametric Models of chip geometry .....	E.20
E.6.2 Parametric Models of tool wear .....	E.22
E.6.3 Parametric Models of cutting force .....	E.23
E.7 Conclusions.....	E.23
E.8 Future lines .....	E.25
References.....	E.27

### **Anexo I: Informe Metalográfico de la aleación Ti6Al4V**

A.I.1 Informe Metalográfico.....	A.I.1
----------------------------------	-------

### **Anexo II: Diseño de probeta**

A.II.1 Diseño de probeta.....	A.II.1
-------------------------------	--------

### **Anexo III: Procedimiento para captura de señales de Fuerzas de Corte**

A.III.1 Introducción .....	A.III.1
A.III.2 Procedimiento para el diseño de un proyecto.....	A.III.2
A.III.3 Verificación de señales eléctricas .....	A.III.6
A.III.4 Adaptación de equipos.....	A.III.7
Referencias .....	A.III.8

### **Anexo IV: Equipamiento para la Adquisición de Datos**

A.IV.1 Modulo LAN-XI .....	A.IV.1
A.IV.2 Acelerómetro .....	A.IV.9
A.IV.3 Martillo de Impacto.....	A.IV.17
A.IV.4 Amplificador de carga .....	A.IV.22
A.IV.5 Calibrador de vibraciones .....	A.IV.31
A.IV.6 Dinamómetro .....	A.IV.35

## **Anexo V: Protocolo de ensayos**

A.V.1 Protocolo de ensayo.....	A.V.1
--------------------------------	-------

## **Anexo VI: Hoja de cálculo de los parámetros de entrada**

A.VI.1 Hoja de cálculo para parámetros de entrada.....	A.VI.1
--	--------

## **Anexo VII: Gráficas representativas de las fuerzas de corte**

A.VII.1 Gráficas representativas de las fuerzas de corte.....	A.VII.1
---	---------

## **Anexo VIII: Gráficas representativas de modelos ajustados**

A.VIII.1 Gráficas representativas de modelos ajustados.....	A.VIII.1
---	----------

## **Anexo IX: Publicaciones**

A.IX.1 Técnicas Metalográficas para la Caracterización Morfológica de la Viruta en el Mecanizado de Aleaciones Ligeras de Uso Aeronáutico.....	A.IX.1
--	--------

A.IX.2 Propuesta metodológica para la caracterización de la viruta en el torneado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V).....	A.IX.2
--	--------

A.IX.3 Study of the influence of the cutting parameters on the chip geometry during machining alloy UNS A97075.....	A.IX.3
---	--------

A.IX.4 Estudio experimental de las fuerzas de corte durante el mecanizado con aleaciones de titanio.....	A.IX.4
--	--------







# Listado de Figuras

---



## Capítulo 2: Caracterización morfológica de la viruta en el proceso de mecanizado. Una aproximación al Estado del Arte.

Figura 2.1 Línea del tiempo del mecanizado como proceso de fabricación. ....	2.3
Figura 2.2 Variables que interfieren en el mecanizado. Adaptada de [6]. ....	2.4
Figura 2.3 Morfología de viruta y la productividad en el mecanizado. Adaptada de [7]. ....	2.5
Figura 2.4 Factores de influencia en la formación de la viruta. ....	2.6
Figura 2.5 a) Fotograma del mecanismo de formación de viruta. Adaptada de [31], b) Viruta visualizada por técnica FEA. ....	2.9
Figura 2.6 Análisis de viruta bajo diversas técnicas; a) y b) SOM (Microscopía Óptica Estereoscópica), c) SEM (Microscopía electrónica de barrido). Adaptada de [2]. ....	2.10
Figura 2.7 a) Modelo sobre el mecanizado de viruta. Adaptada en [16], b) banda de deformación en viruta segmentada [34]. ....	2.10
Figura 2.8 Representación del modelo de Time y Merchant. ....	2.11
Figura 2.9 Modelo de formación de viruta propuesto por Ernst y Merchant. ....	2.12
Figura 2.10 Aspecto de físico de la viruta, a) Cara externa y b) interna. ....	2.15
Figura 2.11 Clasificación de salida y rotura de la viruta. Adaptada de [37]. ....	2.15
Figura 2.12 a) Esquema de la viruta en del corte ortogonal, b) Aproximación de corte en la operación de torneado. ....	2.17
Figura 2.13 Aspectos geométricos de la viruta en vista trasversal y longitudinal. ....	2.17
Figura 2.14 Vista a detalle de la zona de corte. ....	2.19
Figura 2.15 Evolución de los materiales y recubrimientos para herramientas de corte [6]. ....	2.26
Figura 2.16 Evolución de la dureza de las herramientas de corte en función de la temperatura alcanzada en el mecanizado [56]. ....	2.26
Figura 2.17 Parámetros geométricos para la medición del desgaste. ....	2.29
Figura 2.18 Diagrama de calor durante el mecanizado. Adaptada de [73]. ....	2.33
Figura 2.19 Diagrama de fuerzas durante la operación de corte. Adaptada de [6]. ....	2.34

## Capítulo 3: Estado del Arte: Mecanizado de Aleaciones Ligeras

Figura 3.1 Desarrollo de materiales a nivel global. Adaptada [1]. ....	3.1
Figura 3.2 Reserva mundial: a) de $\text{FeTiO}_3$ , b) $\text{TiO}_2$ en los últimos años. Adaptada [5]. ....	3.4
Figura 3.3 Producción mundial de $\text{TiO}_2$ durante los últimos años. Adaptada [7]. ....	3.5
Figura 3.4 Consumo de $\text{TiO}_2$ en China durante los últimos años. Adaptada [10]. ....	3.5

Figura 3.5 Uso y consumo mundial del titanio como metal en diversos sectores. Adaptada [3].....	3.6
Figura 3.6 Demanda de materia prima para el sector aéreo. Adaptada [16]. ....	3.8
Figura 3.7 Comparación de compañías en relación al material empleado y % reducción en peso.....	3.9
Figura 3.8 Densidad del Ti frente a otros metales. Adaptada [25]. ....	3.12
Figura 3.9 Esquema representativo de cambio de fase de la aleación <i>Ti6Al4V</i> .....	3.14
Figura 3.10 Clasificación de viruta de <i>Ti6Al4V</i> en función de los parámetros de corte [41].....	3.16

## Capítulo 4: Metodología Experimental

Figura 4.1 Esquema metodológico establecido en esta línea de investigación. ....	4.3
Figura 4.2 Imagen mediante técnica de microscopia electrónica de energía dispersiva (EDS, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) de la aleación <i>Ti6Al4V</i> .....	4.5
Figura 4.3 Esquema sobre las variables de estudio establecidas en esta tesis. ....	4.7
Figura 4.4 Maquinaria utilizada en los ensayos: Torno convencional Pinacho S-90/180. ....	4.9
Figura 4.5 Herramienta de ranurado frontal. a) Vista general, b) Características geométricas.....	4.11
Figura 4.6 Herramienta para corte ortogonal. a) Vista general, b) Características geométricas mediante codificación ISO.....	4.12
Figura 4.7 Diseño experimental con corte ortogonal.....	4.12
Figura 4.8 a) Suministro y adaptación, b) Diseño y c) Codificación de probeta. ....	4.14
Figura 4.9 Geometría de corte, a) Aproximación del corte en el torno y b) corte ortogonal.....	4.15
Figura 4.10 Diseño de probeta de ensayo.....	4.16
Figura 4.11 Geometría del desahogo para cada bloque de trabajo. ....	4.19
Figura 4.12 a) Fresado manual para el desahogo, b) Corte deseado para ensayo ortogonal.....	4.19
Figura 4.13 Codificación de ensayos.....	4.19
Figura 4.14 Diagrama de flujo para la captura de datos. ....	4.21
Figura 4.15 Esquema de trabajo para adquisición de fuerzas. ....	4.22
Figura 4.16 Caja de plaquitas con identificación de filo por tipo de ensayo. ....	4.26
Figura 4.17 Diagrama de flujo para la realización de ensayos.....	4.28
Figura 4.18 Conceptos básicos de 5's adaptados a la ejecución de ensayos .....	4.29
Figura 4.19 Esquema sobre las técnicas de estudio establecidas en esta tesis. ....	4.31

Figura 4.20 Diagrama de flujo para la elaboración de ensayos microscópicos en fragmentos de viruta. ....	4.33
Figura 4.21 Ejemplo de imágenes para la caracterización de la herramienta a distintos zoom.....	4.38
Figura 4.22 Ejemplo de selección y trazabilidad de las muestras durante el mecanizado de una aleación ligera. Adaptada [38]. ....	4.39
Figura 4.23 Parámetros geométricos de la viruta. ....	4.39
Figura 4.24 Aspectos físicos de la viruta, a) Cara externa y b) Cara interna de la viruta. ..	4.40
Figura 4.25 Ventana de estudio sobre la $F_c$ .....	4.42

## Capítulo 5: Interpretación y Discusión de los Resultados

Figura 5.1 Probeta de <i>Ti6Al4V</i> bajo la técnica EDS.....	5.2
Figura 5.2 Microestructura de la aleación <i>Ti6Al4V</i> : Imagen a) EDS y b) SOM.....	5.2
Figura 5.3 a) Equipo de microscopia SOM y b) Aspectos geométricos de la viruta .....	5.3
Figura 5.4 Diseño del corte: a) Cilindrado de probeta, b) Imagen de viruta mediante SOM.	5.5
Figura 5.5 Deformación en la estructura de viruta tras el mecanizado con $f$ de 0,05 mm/r bajo ciertos valores de $V_c$ : a) 30 m/min, b) 125 m/min; ambas imágenes a 100X.....	5.5
Figura 5.6 Aspecto físico de la viruta: a) Cara externa y b) interna.....	5.6
Figura 5.7 Evolución geométrica de la viruta: a) $h_c$ y b) $h_v$ a diversos rangos de $f$ [mm/r] con respecto a distintas $V_c$ [m/min]. ....	5.10
Figura 5.8 Evolución geométrica de la viruta: a) $S$ y b) $\phi$ a diversos rangos de $f$ [mm/r] con respecto a distintas $V_c$ [m/min]. ....	5.11
Figura 5.9 Evolución geométrica de la viruta: a) $h_c$ y b) $h_v$ a distintas $V_c$ [m/min] con respecto a diversos rangos de $f$ [mm/r]. ....	5.12
Figura 5.10 Evolución geométrica de la viruta: a) $S$ y b) $\phi$ a distintas $V_c$ [m/min] con respecto a diversos rangos de $f$ [mm/r]. ....	5.13
Figura 5.11 Evolución geométrica de la viruta: a) $b_v$ y b) $\zeta$ a diversos rangos de $f$ [mm/r] con respecto a distintas $V_c$ [m/min]. ....	5.15
Figura 5.12 Evolución geométrica de la viruta: a) $S_v$ y b) $G_s$ a diversos rangos de $f$ [mm/r] con respecto a distintas $V_c$ [m/min]. ....	5.16
Figura 5.13 Evolución geométrica de la viruta: a) $b_v$ y b) $\zeta$ a distinta $V_c$ [m/min] con respecto a diversos rangos de $f$ [mm/r]. ....	5.17
Figura 5.14 Evolución geométrica de la viruta: a) $S_v$ y b) $G_s$ a distinta $V_c$ [m/min] con respecto a diversos rangos de $f$ [mm/r]. ....	5.18
Figura 5.15 Esquema de trabajo para adquisición de fuerzas. ....	5.19

Figura 5.16 Ejemplo sobre la ventana de estudio relacionada con $F_c(t_m)$ .....	5.20
Figura 5.17 Ejemplo sobre la medida obtenida en $F_c$ y $F_f(t_m)$ con respecto a cada intervalo de trabajo ( $f$ y $V_c$ ).....	5.21
Figura 5.18 Ejemplo sobre la ventana de estudio relacionada con $F_f(t_m)$ . ....	5.22
Figura 5.19 Evolución de las fuerzas: a) $F_c$ y $F_f$ a distintos rangos de $f$ [mm/r] con respecto a diversos valores de $V_c$ [m/min]. ....	5.24
Figura 5.20 Evolución de las fuerzas: a) $F_c$ y $F_f$ a diversos valores de $V_c$ [m/min] con respecto a distintos rangos de $f$ [mm/r]. ....	5.25
Figura 5.21 Tendencia de $VB$ con respecto a $f$ [mm/r]. ....	5.30
Figura 5.22 Tendencia de $VB$ con respecto a distintos rangos $V_c$ [m/min]. ....	5.31
Figura 5.23 Tendencia de $AB$ con respecto a distintos rangos $V_c$ [m/min]. ....	5.32
Figura 5.24 Tendencia de fuerzas de corte y desgaste de la herramienta con respecto a $V_c$ .....	5.32
Figura 5.25 Modelos paramétricos relacionados con la viruta: a) $h_c$ , b) $h_v$ , c) $S$ y d) $S_v$ respecto a $f$ y $V_c$ . ....	5.34
Figura 5.26 Modelos paramétricos relacionados con la viruta: a) $\phi$ , b) $b_v$ , c) $\zeta$ y d) $G_s$ respecto a $f$ y $V_c$ . ....	5.36
Figura 5.27 Modelos paramétricos relacionados con a) $F_c$ y $F_f$ para diversos rangos de $f$ y $V_c$ .....	5.37
Figura 5.28 Modelos paramétricos relacionados con el desgaste de la herramienta: a) $VB$ y b) $AB$ para diversos rangos de $f$ y $V_c$ . ....	5.38

## Thesis English Summary

Figure E.1 Shecmatic desing of workpiece. ....	E.4
Figure E.2 Metallurgical setup. ....	E.4
Figure E.3 Parameters measured: a) chip and b) tool wear using SOM technique. ....	E.5
Figure E.4 Orthogonal cutting setup. ....	E.5
Figure E.5 Typical variation of $F_c$ records. ....	E.6
Figure E.6 Typical spectrum records of $F_c$ and $F_f$ (only for $F_c$ detail for the zones). ....	E.7
Figure E.7 Typical variation of $F_f$ records.....	E.7
Figure E.8 Micrographs of grain chip during experimental test of $V_c$ : a) 30 m/min, b) 125 m/min. ....	E.8
Figure E.9 Chip geometry results: a) $h_c$ , b) $h_v$ , c) $S$ , d) $\phi$ by different range of $V_c$ and $f$ . ....	E.12
Figure E.10 Overall chip geometry results: a) $b_v$ , b) $\zeta$ , c) $S_v$ , d) $G_s$ by different range of $V_c$ and $f$ . ....	E.13

Figure E.11 Experiments results of flank wear $VB$ versus the $V_c$ [m/min].	E.17
Figure E.12 Experiments results of rake wear $AB$ versus the $V_c$ [m/min].	E.17
Figure E.13 Experiments results of $F_c$ and $F_f$ versus different ranges of $V_c$ [m/min].	E.18
Figure E.14 Relationship between of $F_c$ and $F_f$ versus different types of tool wear $VB$ , $AB$ .	E.19
Figure E.15 Parametric models of the chip. a) $h_c$ , b) $h_v$ , c) $S$ y d) $S_v$ as a function of $f$ , $V_c$ .	E.21
Figure E.16 Parametric models of the chip. a) $\phi$ , b) $b_v$ , c) $\zeta$ y d) $G_s$ as a function of $f$ , $V_c$ .	E.22
Figure E.17 Parametric models of the tool wear. a) $VB$ y b) $AB$ as a function of $f$ , $V_c$ .	E.22
Figure E.18 Parametric models of the cutting forces. a) $F_c$ y b) $F_f$ as a function of $f$ , $V_c$ .	E.23

### Anexo III: Procedimiento para captura de señales de Fuerza de Corte

Figura A.III.1 Diagrama de fases para elaborar un proyecto por <i>Brüel&amp;Kjær®</i> .	A.III.1
---	---------

### Anexo VII: Gráficas representativas de Fuerzas de Corte

Figura A.VII.1 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [30 m/min] y $f$ [0,05 mm/r].	A.VII.1
Figura A.VII.2 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [30 m/min] y $f$ [0,1 mm/r].	A.VII.2
Figura A.VII.3 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [30 m/min] y $f$ [0,2 mm/r].	A.VII.3
Figura A.VII.4 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [30 m/min] y $f$ [0,3 mm/r].	A.VII.4
Figura A.VII.5 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [45 m/min] y $f$ [0,05 mm/r].	A.VII.5
Figura A.VII.6 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [45 m/min] y $f$ [0,1 mm/r].	A.VII.6
Figura A.VII.7 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [45 m/min] y $f$ [0,2 mm/r].	A.VII.7
Figura A.VII.8 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [45 m/min] y $f$ [0,3 mm/r].	A.VII.8
Figura A.VII.9 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [65 m/min] y $f$ [0,05 mm/r].	A.VII.9
Figura A.VII.10 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [65 m/min] y $f$ [0,1 mm/r].	A.VII.10
Figura A.VII.11 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [65 m/min] y $f$ [0,2 mm/r].	A.VII.11
Figura A.VII.12 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [65 m/min] y $f$ [0,3 mm/r].	A.VII.12
Figura A.VII.13 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [80 m/min] y $f$ [0,05 mm/r].	A.VII.13
Figura A.VII.14 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [80 m/min] y $f$ [0,1 mm/r].	A.VII.14
Figura A.VII.15 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [80 m/min] y $f$ [0,2 mm/r].	A.VII.15
Figura A.VII.16 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [80 m/min] y $f$ [0,3 mm/r].	A.VII.16
Figura A.VII.17 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [100 m/min] y $f$ [0,05 mm/r].	A.VII.17

Figura A.VII.18 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [100 m/min] y $f$ [0,1 mm/r].....	A.VII.18
Figura A.VII.19 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [100 m/min] y $f$ [0,2 mm/r].....	A.VII.19
Figura A.VII.20 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [100 m/min] y $f$ [0,3 mm/r].....	A.VII.20
Figura A.VII.21 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [125 m/min] y $f$ [0,05 mm/r].....	A.VII.21
Figura A.VII.22 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [125 m/min] y $f$ [0,1 mm/r].....	A.VII.22
Figura A.VII.23 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [125 m/min] y $f$ [0,2 mm/r].....	A.VII.23
Figura A.VII.24 Evolución de $F_c$ y $F_f$ para $V_c$ [125 m/min] y $f$ [0,3 mm/r].....	A.VII.24

### **Anexo VIII: Gráficas representativas de modelos ajustados**

Figura A.VIII.1 Modelos con ajuste relacionados con la viruta: a) $h_c$ , b) $h_v$ , c) $S$ y d) $S_v$ respecto a $f$ , $V_c$ .....	A.VIII.2
Figura A.VIII.2 Modelos con ajuste relacionados con la viruta: a) $\phi$ , b) $b_v$ , c) $\zeta$ y d) $G_s$ respecto a $f$ , $V_c$ .....	A.VIII.4
Figura A.VIII.3 Modelos con ajuste relacionados con a) $F_c$ y b) $F_f$ para diversos rangos de $f$ y $V_c$ .....	A.VIII.5
Figura A.VIII.4 Modelos con ajuste relacionados con el desgaste de la herramienta: a) $VB$ y b) $AB$ para diversos rangos de $f$ y $V_c$ .....	A.VIII.6







# Listado de Tablas

---

*Metodología para la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras de uso  
aeronáutico a través del análisis de la viruta*

---



## Capítulo 2: Caracterización Morfológica de la Viruta en el proceso de Mecanizado. Una Aproximación al Estado del Arte

Tabla 2.1 Tipos de viruta.....	2.13
Tabla 2.2 Clasificación de la forma de viruta de acuerdo a la norma ISO 3685:1993 y representada por Boothroyd. Adaptada de [37]. .....	2.14
Tabla 2.3 Tipos de desgastes en plaquitas de corte.....	2.28
Tabla 2.4 Energía específica durante el mecanizado de diferentes materiales.....	2.36

## Capítulo 3: Estado del Arte: Mecanizado de Aleaciones Ligeras

Tabla 3.1 Aplicaciones del Titanio .....	3.7
Tabla 3.2 Partes estratégicas de la aeronave donde se emplean aleaciones con base Ti [17].....	3.9
Tabla 3.3 Propiedades del Titanio .....	3.11
Tabla 3.4 Comparativa de propiedades del titanio con diversos metales ligeros [17]. .....	3.11
Tabla 3.5 Aleaciones del Titanio.....	3.13
Tabla 3.6 Propiedades de la <i>Ti6Al4V</i> . Adaptada [25]. .....	3.15

## Capítulo 4: Metodología Experimental

Tabla 4.1 Composición de la aleación <i>Ti6Al4V</i> (% en masa).....	4.6
Tabla 4.2 Valores de $V_c$ , $f$ y $ap$ utilizados en los ensayos. ....	4.9
Tabla 4.3 Características de la herramienta de ranurado frontal. ....	4.11
Tabla 4.4 Características de la herramienta para los ensayos.....	4.12
Tabla 4.5 Valores de $t_d$ en función a la velocidad de giro establecida para cada ensayo. ....	4.17
Tabla 4.6 Cálculos para el diseño del desahogo. ....	4.18
Tabla 4.7 Codificación de ensayos.....	4.20
Tabla 4.8 Cálculo de parámetros de entrada.....	4.24
Tabla 4.9 Características del equipo empleado para adquisición de datos.....	4.24
Tabla 4.10 Codificación de ensayo.....	4.26
Tabla 4.11 Resumen de ensayos con respecto a $V_c$ y $f$ . ....	4.27
Tabla 4.12 Resumen de ensayos con respecto $V_c$ y $f$ .....	4.27
Tabla 4.13 Formato para clasificar los datos adquiridos en cada ensayo .....	4.29
Tabla 4.14 Procedimiento de selección y almacenamiento de fragmentos de viruta. ....	4.34
Tabla 4.15 Protocolo para el tratamiento de imagen. ....	4.36



Tabla 4.16 Guía para la medición de la viruta. ....	4.41
---	------

## Capítulo 5: Interpretación y Discusión de los Resultados

Tabla 5.1 Composición de la aleación <i>Ti6Al4V</i> (% en masa).....	5.2
Tabla 5.2 Imágenes de la viruta mediante SOM a 1X obtenida en función $V_c$ con respecto a $f$ .....	5.4
Tabla 5.3 Vista longitudinal de la viruta a 20X en función de la $V_c$ con respecto a $f$ .....	5.7
Tabla 5.4 Vista transversal de la viruta a 10X en función de la $V_c$ y $f$ .....	5.8
Tabla 5.5 Resumen de fuerzas $F_c$ y $F_f$ para distintos rangos de $V_c$ en función de diferentes valores de $f$ .....	5.22
Tabla 5.6 Resumen de tendencias $F_c$ y $F_f$ a distintos rangos de $V_c$ en función de diversos valores de $f$ .....	5.26
Tabla 5.7 Resumen de tiempo de mecanizado a distintos rangos de $V_c$ en función de diversos valores de $f$ .....	5.26
Tabla 5.8 Aspectos macroscópicos de la herramienta de corte, imágenes SOM a 2X.....	5.27
Tabla 5.9 Aspectos macroscópicos de la herramienta de corte, imágenes SOM a 1,5X.....	5.29

## Thesis English Summary

Table E.1 Composition of <i>Ti6Al4V</i> (wt%).....	E.3
Table E.2 Cutting Parameters. ....	E.3
Table E.3 Micrographs of the different chip types produced during turning process. ....	E.9
Table E.4 Images of wear mechanisms on tool rake and flank face during cutting process.....	E.15

## Anexo III: Procedimiento para captura de señales de Fuerza de Corte

Tabla A.III.1 Procedimiento para el diseño de un proyecto.....	A.III.2
Tabla A.III.2 Procedimiento para verificar señales.....	A.III.6
Tabla A.III.3 Actividades realizadas para la captura de señales.....	A.III.7

## Anexo VI: Hoja de Cálculo

Tabla A.VI.1 Hoja de cálculo para parámetros de entrada.....	A.VI.1
--	--------





# CAPÍTULO 1

---

## GENERALIDADES DE LA TESIS DOCTORAL



**Índice**

<b>1.1</b>	<b>Ámbito de la Tesis Doctoral .....</b>	<b>1.1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo de la Tesis Doctoral .....</b>	<b>1.2</b>
<b>1.3</b>	<b>Estructura de la Tesis Doctoral.....</b>	<b>1.3</b>



## 1.1 Ámbito de la Tesis Doctoral

El panorama actual que afronta el sector aéreo está dirigido, entre otros aspectos, al conformado de componentes mecánicos con elevados niveles de precisión mediante procesos de alto rendimiento. Ello conlleva la necesidad de rediseñar procesos y productos hacia una máxima sostenibilidad, mediante estrategias centradas en mejorar su fabricación con una elevada funcionalidad en el diseño de la aeronave, garantizando al máximo su fiabilidad y, de manera simultánea, contribuyendo a la reducción de los costos que conlleva su manufactura.

La industria aeroespacial actualmente es reconocida como el sector de mayor inversión tecnológica y de vanguardia, lo que conlleva una gran inversión en investigación y desarrollo tecnológico.

Hoy en día el concepto clave del diseño de un vehículo de transporte aéreo se encuentra en el fuselaje (cuerpo principal de la estructura del avión), la cual conlleva a la reducción de su peso y al rediseño en el conformado de ciertos componentes metálicos que obliga el empleo de alta tecnologías de mecanizado, aplicadas principalmente en aleaciones ligeras (de aluminio y titanio principalmente). Gracias a sus propiedades mecánicas, ha sido posible aumentar el tamaño de dichas aeronaves. Un ejemplo de esta característica se observa en modelos tales como el Airbus 380 y el Boeing 787. Ambos están catalogados como diseños de alta innovación, estando formados por un elevado número de piezas fabricadas con materiales ligeros, viéndose beneficiados al aumentar la resistencia estructural del avión y, en paralelo, consiguiendo reducir su peso, lo que, traducido a nivel operativo, supone menor consumo de combustible y una apreciable reducción de contaminación acústica.

En consecuencia a lo antes mencionado, en este trabajo se analizará el mecanizado de una aleación ligera, concretamente el *Ti6Al4V* (*UNS R56400*), elegida por su aplicación en zonas críticas de las aeronaves debido a sus elevadas propiedades mecánicas, incluso a altas temperaturas, y su excelente resistencia a la corrosión. Desde la perspectiva más general, la selección de este material se ajusta a la demanda actual en dicho sector, siendo objeto de diversas líneas de investigación que ya han dado su fruto en diversas Tesis Doctorales en el seno de los grupos cuya colaboración ha supuesto el origen a esta investigación, como es el caso del grupo de

investigación del *TEP933* de la Universidad de Málaga y del grupo *TEP027* de la Universidad de Cádiz.

Es importante aclarar que, en estos últimos años, el uso de las aleaciones con base de titanio son cada vez más cotizados debido al éxito en las aplicaciones biomédicas, así como también en la industria de la automoción, la aeronáutica o en la construcción naval. Todas estas áreas industriales se benefician de las propiedades que brinda este material, principalmente por su elevada resistencia mecánica, su bajo módulo de elasticidad y su resistencia a la corrosión, que lo convierten en un excelente metal que permite remplazar materiales como los aceros inoxidables o el aluminio. No obstante, también muestra ciertos inconvenientes como es la dificultad a ser procesado.

Bajo este contexto esta Tesis Doctoral se centrada en conocer la importancia e implicación del proceso del conformado de componentes metálicos de uso aeronáutico, específicamente el mecanizado de aleaciones con base de titanio, un proceso de manufactura por arranque de viruta. La viruta juega un papel de protagonista en este proceso ya que, a partir de su morfología, se puede adquirir información valiosa acerca de su comportamiento. En lo que corresponde al proceso por arranque de material, en esta investigación se evalúa el proceso de torneado, por ser un proceso ampliamente estudiado tanto en el ámbito industrial como académico, a la vez que, por su sencillez geométrica, permite modelizar un proceso de corte ortogonal, lo que facilita su análisis. No obstante, en la actualidad dicho proceso conlleva ciertas limitaciones en el caso de materiales tales como la aleación que se estudia, debido fundamentalmente a la ausencia de información en cuanto a su comportamiento. De ahí la importancia de desarrollar un método fiable que permita su caracterización. Para ello se realizará un estudio enfocado al mecanismo de formación de viruta en función de los posibles efectos causados en la herramienta de corte y las fuerzas de corte registradas durante el mecanizado.

## **1.2 Objetivo de la Tesis Doctoral**

En virtud de lo antes mencionado, esta Tesis Doctoral dirige su atención en la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras de uso aeronáutico a través del análisis morfológico de la viruta y su relación fundamental con parámetros tecnológicos asociados al proceso. De acuerdo a ello, se establece a continuación una serie de objetivos, tanto el general como los particulares, que construyen las raíces básicas de esta investigación.

El objetivo general es realizar el diseño metodológico que permita establecer una línea de trabajo con el objetivo de estudiar y caracterizar los efectos de las variables independientes (parámetros tecnológicos) que interactúan durante el mecanizado, definiendo los medios necesarios para la obtención de datos empíricos que permitan identificar el comportamiento del material mediante el análisis y la medición de las variables de salida: el mecanismo de formación de la viruta, los aspectos físicos de la herramienta de corte; en este caso refiriéndose al desgaste sufrido en el filo de corte (mediante la evaluación geométrica del área afectada tanto en la cara de desprendimiento como incidencia) y la relación de las fuerzas de corte.

Para ello, se requiere establecer una serie de objetivos particulares que permitan lograr con éxito lo antes mencionado, los cuales se presentan a continuación.

1. Como punto de partida, se precisará identificar las líneas de estudio vinculadas con la temática de esta investigación, mediante una revisión bibliográfica detallada y encaminada a conocer la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras, materiales actualmente reconocidos como innovadores por sus propiedades mecánicas, a través del análisis de su viruta, siendo dicho proceso una parte esencial en la fabricación de todo componente metálico.
2. Se pretende analizar y caracterizar el comportamiento de las aleaciones ligeras, particularmente aleaciones con base de titanio, mediante el uso de técnicas metalográficas, herramientas clave en la caracterización de materiales metálicos.
3. Se realizará un seguimiento y análisis del proceso de formación de la viruta mediante técnicas de monitorización *OFF-LINE*, en este caso empleando técnicas de observación óptica, caracterizando los parámetros dimensionales de la viruta (longitud, anchura y espesor de la viruta, ángulo de desprendimiento como de cizalladura; entre otras). Dentro de este marco, se incorporará el comportamiento geométrico de la propia herramienta de corte.
4. Por otro lado, se establecerá una evaluación de otros parámetros del proceso mediante la monitorización *ON-LINE*, dirigido a la adquisición de las fuerzas de corte.
5. Se elaborará una metodología que englobe todos los puntos anteriores, incorporando un protocolo experimental adecuado a cada variable de estudio.
6. Una vez finalizada la etapa experimental, se identificarán modelos paramétricos que permitan caracterizar, de forma independiente, la influencia de ciertos parámetros de estudio en el mecanizado, es decir, la influencia que ejercen los parámetros tecnológicos tales como la velocidad de corte  $V_c$ , el avance  $f$  o la profundidad de corte  $ap$  (variables de entrada) sobre los aspectos geométricos de la viruta, efecto sobre la herramienta (desgaste en cara de incidencia y desprendimiento) y adquisición de las fuerzas de corte (variables de salida).

### 1.3 Estructura de la Tesis Doctoral

A continuación se describirá de forma general la estructura global establecida en la presente Tesis Doctoral, distribuida en cinco capítulos más éste introductorio, describiendo en cada uno de ellos su finalidad y las principales actividades que lo conforman.

Así, el Capítulo 2 (*Caracterización Morfológica de la Viruta en el Proceso de Mecanizado. Una Aproximación al Estado del Arte*) se centra en establecer las bases necesarias que permitan una aproximación al estado del arte, con especial atención al proceso morfológico de la viruta durante el torneado en seco. Para ello, es necesario identificar ciertas líneas de investigación de ámbito tanto internacional como nacional

relacionadas con la temática. Dentro este mismo ámbito, se ha identificado una serie de modelos matemáticos aplicables a la predicción del comportamiento del mecanizado en función de las variables de entrada consideradas en el proceso de corte ( $V_c$ ,  $f$  y  $ap$ ) y su relación con el mecanismo de formación de la viruta. Estos modelos facilitarán la selección de los valores de los parámetros de corte a aplicar, de forma experimental, con el objetivo de identificar una posible mejora en el rendimiento del mecanizado.

El Capítulo 3 (*Estado del Arte: Mecanizado de Aleaciones Ligeras*) está constituido por diversos estudios que abordan el uso y características de ciertos materiales estratégicos en el sector industrial, centrados específicamente para el sector aéreo. En primer lugar, se consideran estudios desde puntos de vista tanto económicos como técnicos (maquinabilidad, propiedades mecánicas, aplicaciones, ventajas; etc.), en este caso enfatizados a las aleaciones ligeras y, concretamente, a las aleaciones con base de titanio ( $Ti6Al4V$ ). Como tema de gran interés, se hace referencia a diversos estudios que permiten caracterizar el mecanizado de la aleación  $Ti6Al4V$  (UNS R56400) mediante el análisis morfológico de la viruta, las fuerzas de corte obtenidas durante el proceso de corte y, sobre todo, los efectos causados en la propia geometría de la herramienta. Con este capítulo se pretende caracterizar una aproximación bibliográfica del estado del arte de dicho material. Se ha realizado una división del estado del arte en dos capítulos independientes debido a las características claramente diferenciadas de los contenidos de cada uno de ellos.

Por su parte, el Capítulo 4 (*Metodología Experimental*) está dedicado al desarrollo específico de la metodología experimental utilizada para esta investigación, así como las características de los recursos empleados (técnicas, equipamiento, procedimientos internos, etc.) que permiten llevar a cabo el desarrollo de este estudio.

El Capítulo 5 (*Interpretación y Discusión de los Resultados*) está constituido por una serie de datos que presentan el análisis y la discusión de los resultados obtenidos experimentalmente, permitiendo reproducir, de forma esquematizada, las diversas fases del mecanizado obtenidas en tiempo real, con el objetivo de plasmarlas numéricamente, a través de modelos paramétricos que permitan caracterizar el proceso de mecanizado en seco de la aleación ligera  $Ti6Al4V$ , bajo ciertas condiciones de trabajo.

Finalmente, en el Capítulo 6 (*Conclusiones y Líneas futuras*) se incluye el conjunto de conclusiones que derivan esta Tesis Doctoral, complementadas con diversas propuestas, establecidas como líneas de desarrollo futuro, que pueden ser utilizadas para permitir avances adicionales a los ya obtenidos en esta investigación.

Como punto adicional, conviene indicar que en cada capítulo se encuentra una sección dirigida a aquellas referencias bibliográficas que han empleadas durante el desarrollo de esta investigación.

Al conjunto de los capítulos anteriormente referidos se suman un total de siete anexos, en los que se presenta información adicional que complementa los desarrollos de



éstos. En concreto, en el Anexo I se incluye el informe de ensayo metalográfico realizado a la aleación empleada en los ensayos de esta Tesis. El anexo II está constituida por un plano con los datos geométricos del diseño de la probeta. El anexo III muestra el procedimiento empleado en la captura de señales para la caracterización de las fuerzas de corte y las características del software utilizado. En el Anexo IV se describe el conjunto de equipos utilizados para la adquisición de datos a través de sus fichas técnicas. El Anexo V presenta el protocolo de ejecución de los ensayos realizados en el torno, definiendo las fases de las seis tipologías empleadas e identificando los valores de los parámetros en la puesta a punto y los métodos de verificación. En el Anexo VI se incluye la hoja de cálculo de los parámetros de entrada. Posteriormente, el Anexo VII está formado por el conjunto completo de gráficos que muestran el comportamiento de las fuerzas de corte durante la ejecución de los ensayos. Finalmente, el Anexo VIII presenta de forma gráfica los modelos ajustados en base a los datos obtenidos de forma experimental. Como dato adicional, el Anexo IX presenta las publicaciones emitidas durante el desarrollo de esta línea de investigación.



# CAPÍTULO 2

---

## CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA VIRUTA EN EL PROCESO DE MECANIZADO. UNA APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE



## Índice

<b>2.1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>2.1</b>
<b>2.2</b>	<b>Desarrollo tecnológico en los procesos de fabricación. Mecanizado por arranque de viruta. ....</b>	<b>2.2</b>
<b>2.3</b>	<b>Morfología de la viruta durante el mecanizado .....</b>	<b>2.4</b>
<b>2.4</b>	<b>Mecanismos de formación de la viruta .....</b>	<b>2.9</b>
<b>2.5</b>	<b>Tipos de la viruta producida durante el mecanizado .....</b>	<b>2.12</b>
<b>2.6</b>	<b>Geometría de la viruta en base al tipo de corte.....</b>	<b>2.16</b>
<b>2.7</b>	<b>Aspectos geométricos de la viruta .....</b>	<b>2.17</b>
2.7.1	Altura de cresta de la viruta, $h_c$ .....	2.18
2.7.2	Altura de valle de la viruta, $h_v$ .....	2.18
2.7.3	Sección de la viruta, $S$ .....	2.19
2.7.4	Ángulo de cizalladura, $\phi$ .....	2.20
2.7.5	Área de la viruta, $S_v$ .....	2.21
2.7.6	Anchura de la viruta, $b_v$ .....	2.21
2.7.7	Factor de recalcado o acortamiento de la viruta, $\zeta$ .....	2.21
2.7.8	Grado de segmentación, $G_s$ .....	2.22
<b>2.8</b>	<b>Factores de influencia en la viruta .....</b>	<b>2.22</b>
2.8.1	Propiedades del material a mecanizar .....	2.22
2.8.2	Parámetros tecnológicos de corte.....	2.23
2.8.2.1	Avance, $f$ .....	2.24
2.8.2.2	Velocidad de corte, $V_c$ .....	2.24
2.8.2.3	Profundidad de corte, $p$ o $ap$ .....	2.25
2.8.3	Herramienta de corte .....	2.25
2.8.4	Desgaste y vida de la herramienta .....	2.27
2.8.5	Maquinaria y operación de trabajo .....	2.30
<b>2.9</b>	<b>Condiciones de corte vinculadas con el medio ambiente.....</b>	<b>2.30</b>
<b>2.10</b>	<b>Transferencia de calor durante el mecanizado.....</b>	<b>2.32</b>
<b>2.11</b>	<b>Correlación de las fuerzas en el mecanizado .....</b>	<b>2.34</b>
<b>2.12</b>	<b>Técnicas de monitorización aplicables al mecanizado .....</b>	<b>2.36</b>
2.12.1	Monitorización del proceso .....	2.37
2.12.2	Monitorización de la herramienta de corte .....	2.38
2.12.3	Monitorización de la pieza de trabajo.....	2.40
<b>2.13</b>	<b>Modelos paramétricos relacionados con el mecanizado .....</b>	<b>2.41</b>
2.13.1	Modelos relacionados con aspectos geométricos de la viruta.....	2.42
2.13.2	Modelos relacionados con la herramienta de corte .....	2.43
2.13.3	Modelos relacionados con las fuerzas de corte .....	2.44
<b>2.14</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>2.45</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>2.46</b>



## 2.1 Introducción

Desde la perspectiva más general, los continuos retos tecnológicos que enfrenta el sector industrial (aeronáutico, biomédico, automoción, construcción, etc.) en las últimas décadas se encuentran centrados en la improvisación de manera continua en sus procesos productivos, con la intención de aportar valor añadido al producto y compaginar con el cumplimiento de las regulaciones medioambientales que interfieren en el funcionamiento como la fabricación de todo componente; permitiendo conservar y reforzar una ventaja competitiva que brinde una estabilidad en el mercado industrial.

Así, este proyecto doctoral centra su interés en evaluar uno de los principales desafíos a los que se enfrenta el sector aeronáutico, relacionado con la innovación en sus procesos. El mecanizado es uno de los procesos más empleados para la elaboración de componentes estratégicos para vehículo de transporte aéreo; precisándose en el desarrollo de nuevos materiales alternativos en los que destacan las aleaciones ligeras debido a sus cualidades de baja densidad y excelentes propiedades mecánicas (razón de ello se considera un apartado adicional, capítulo 3; que concisa las ventajas e inconvenientes del uso de dichos materiales).

Por ello, se sugiere disponer como primera instancia un análisis detallado del mecanizado de este tipo de aleaciones a través de la caracterización morfológica de la viruta. Por una parte, reforzaría el conocimiento básico del proceso, dada su relación con otros factores que afectan de forma notable en el rendimiento del mecanizado, como el desgaste de la herramienta de corte o la integridad superficial de la pieza de trabajo; y por otra, permitiría identificar las variables que intervienen en la viruta.

Por lo que respecta a esta Tesis Doctoral, se encuentra relacionada con varias líneas de investigación vinculadas a la Universidad de Málaga [1] y la Universidad de Cádiz [2, 3]. No obstante, este proyecto propone una perspectiva alternativa que permita caracterizar el proceso de corte mediante un estudio exhaustivo, caracterizado en la viruta, que responda a las necesidades del rediseño del proceso de mecanizado por arranque de viruta (dado el gran número de variables que intervienen), permitiendo conocer otra faceta del mecanizado. Por ello, se establece una revisión del estado de arte, realizado mediante una recopilación bibliográfica de forma sintetizada, con la finalidad de crear un panorama global que permita responder a ciertas interrogantes relacionadas a la idea central de esta investigación.

## **2.2 Desarrollo tecnológico en los procesos de fabricación. Mecanizado por arranque de viruta.**

Para dar comienzo a este apartado se procede a revisar los conceptos más relevantes relacionados con el desarrollo tecnológico de los procesos de fabricación, especialmente en el mecanizado por arranque de viruta, a fin de identificar su tendencia de los últimos años. Por ello, es recomendable recordar que la mayoría de los objetos que nos rodean fueron diseñados y fabricados para cubrir una necesidad específica y poseen diversas formas geométricas o podrían estar compuestos de elementos interrelacionados que proporcionan un producto o servicio. Ahora bien, considerando lo anterior, para conformar dichos “objetos” es necesario aplicar diversas técnicas básicas, entre las que destaca el “corte” como una de las más antiguas, predominando en la edad de piedra. Y hoy en día, forma parte de la familia de los procesos de conformado por eliminación de material de mayor uso a nivel industrial.

El mecanizado se ha desarrollado por una serie de acontecimientos históricos cuya influencia marcan una pauta importante en su evolución, los cuales destacan nuevas fuentes generadoras de energía, el crecimiento en el sector metalúrgico, el uso de técnicas de control numérico o el desarrollo de nuevos materiales para herramientas de corte, por mencionar algunos.

Al estudiar la línea del tiempo del mecanizado como proceso de fabricación, se distinguen distintas vertientes de la operación de corte tales como el taladrado, fresado, rectificado y limado, entre otras; cada una de ellas diseñadas para obtener diferentes tipos de geometría (partiendo de una preforma), con un alto nivel de precisión dimensional. Estas evidencias indican que el ser humano fue desarrollando, en base a sus necesidades, múltiples técnicas de fabricación, hasta llegar a nuestros tiempos, generando la adaptación de dichas técnicas a distintos tipos de materiales mediante el diseño de herramientas acorde a la naturaleza requerida para su fabricación.

Hoy en día, el mecanizado se clasifica en dos categorías. Una de ellas corresponde a los procesos mecánicos (convencionales) [4], que permiten remover el exceso de material a través de una herramienta de corte que genera un cizallamiento del material y del que se obtiene, como resultado, la formación de viruta. La otra categoría, conocida como mecanizado avanzado ó no convencional, fundamentalmente opera por otros medios, ya sea eléctricos, fisicoquímicos, por mencionar algunos.

La Figura 2.1 muestra, a modo de resumen, la evolución de aspectos relacionados con la teoría de corte el origen de la máquinas-herramientas utilizadas para distintas operaciones de corte y el desarrollo de materiales para la fabricación de herramientas.



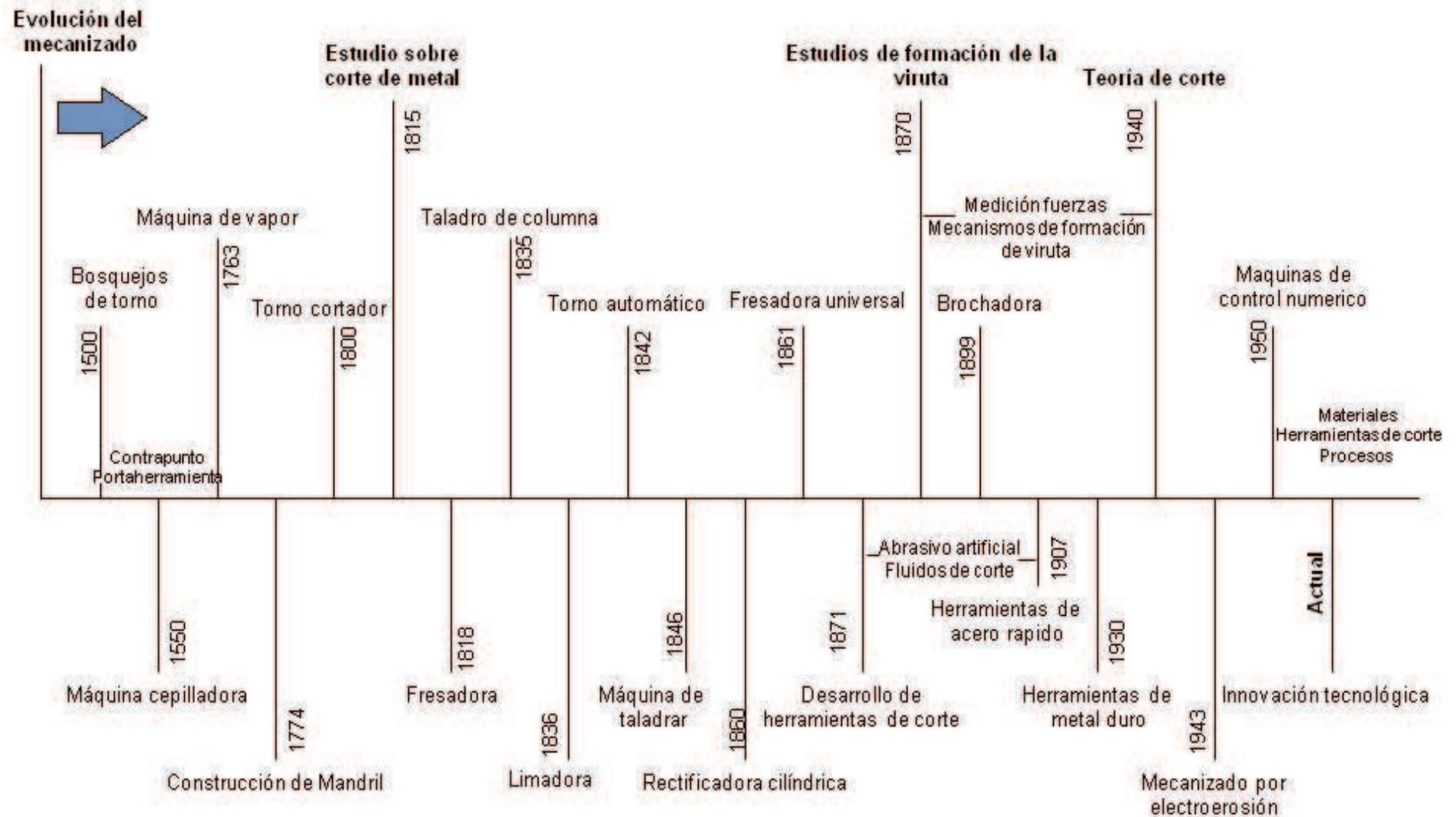
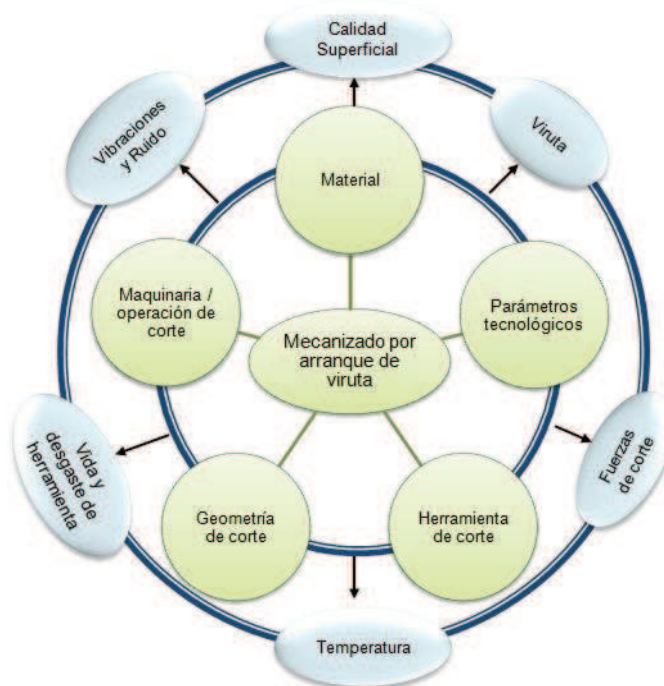


Figura 2.1 Línea del tiempo del mecanizado como proceso de fabricación.

Sobre la base de las ideas expuestas, el proceso de conformado mediante arranque de viruta aporta gran cantidad de desperdicio de material y mayor consumo de energía, afectando de forma económica a la rentabilidad del fabricante desde un punto de vista funcional, económico, energético y medioambiental [5].

En la actualidad, estos procesos suele ser complejos de analizar a nivel industrial (dado el gran número de variables que intervienen entre sí). La Figura 2.2 muestra las variables relacionadas con el mecanizado que interfieren tanto en la entrada (independientes), representadas con tonalidad verde y las variables de salida (dependientes) con tonalidad azul. El esquema permite identificar las bases principales de esta investigación, y los factores de influencia en el mecanismo de formación de la viruta. Para ello, es conveniente realizar una breve revisión bibliográfica, con la intención de comprender las líneas de estudio vinculadas con la temática establecida en este capítulo, donde posteriormente se detallaran algunas aportaciones científicas de mayor relevancia. Todas ellas relacionadas con la morfología de la viruta, desgaste de la propia herramienta de corte y sus correspondientes fuerzas de corte.



**Figura 2.2** Variables que interfieren en el mecanizado. Adaptada de [6].

### 2.3 Morfología de la viruta durante el mecanizado

En primera instancia, es conveniente señalar que el concepto morfológico de viruta, a lo largo de la historia del mecanizado, ha evolucionado de forma acelerada; sin embargo, su esencia permanece constante y se encuentra referenciada como aquel material desprendido mediante las modificaciones o transformaciones que se experimenta a lo largo del corte, permitiendo establecer, de forma general, el comportamiento del mecanizado. Este concepto se encuentra esquematizado mediante una serie de modelos matemáticos.

En primer lugar, se identifica que la morfología de la viruta surge mediante la acción mecánica inicial de la herramienta de corte en contacto con la pieza de trabajo mediante movimientos relativos entre ellos, de modo que, dentro de un tiempo determinado, en la zona de corte se manifiesta mediante el desprendimiento de una fina capa de material de trabajo, llamada viruta, y que, a su vez, genera la superficie de mecanizado deseada.

Las bases expuestas con anterioridad permiten concluir que en todo proceso por arranque de material la viruta juega un papel crucial, tanto a favor como en contra; razón de ello, el interés de analizarla, con la intención de obtener un mejor control de ella, evitando resultados negativos en la productividad del proceso de corte. Para ello, ciertos efectos relacionados con la optimización de la viruta en el mecanizado se encuentran desplegados en la Figura 2.3, agrupados según sean positivos o negativos dichos efectos.

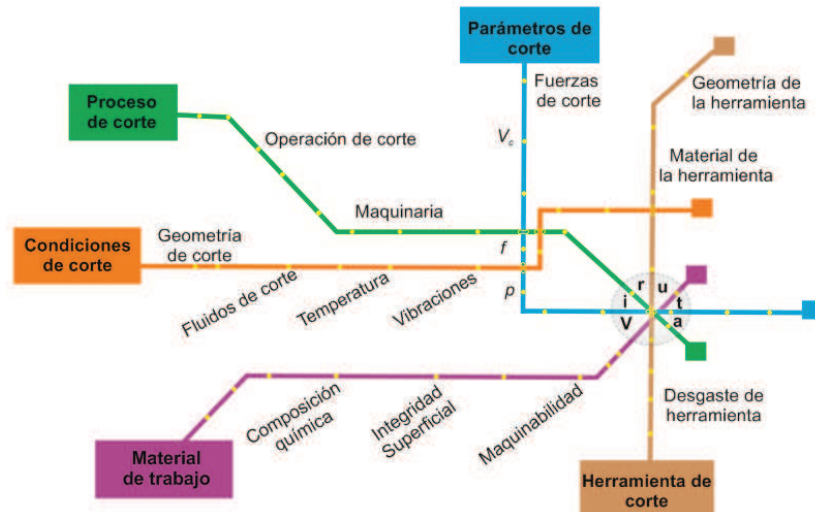


**Figura 2.3** Morfología de viruta y la productividad en el mecanizado. Adaptada de [7].

Algunos investigadores comparten la importancia de identificar y controlar el mecanismo de formación de la viruta, debido a su relación con la eficacia del mecanizado [8, 9]. Estos estudios consideran la morfología de la viruta como un factor crítico en el mecanizado, subrayando su influencia que existe a nivel industrial.

Su estudio permite visualizar a la viruta no solo como desecho metálico, sino también como un indicador factible que permite conocer ciertas condiciones del mecanizado, las propiedades de la pieza de trabajo, así como el estado en que se encuentra la herramienta de corte y su relación con la calidad de la superficie mecanizada. Todo ello se realiza a través del estudio de los aspectos geométricos de la viruta; permitiendo identificar el grado de influencia en la eficiencia del mecanizado.

Por ende, es pertinente analizar una serie de estudios científicos realizados en torno al mecanismo de formación de la viruta, con el propósito de comprender y profundizar en la dinámica del proceso. En la Figura 2.4 se muestran los factores que tienen una mayor relevancia en la formación de la viruta.



**Figura 2.4** Factores de influencia en la formación de la viruta.

Una vez identificados los factores de influencia en el mecanismo de formación de la viruta, se procede a describir una aproximación del estado del arte. Se consideran, para ello, las publicaciones realizadas por Iain Finnie, quién describe la relación existente entre el mecanizado de materiales metálicos y la formación de viruta [10], donde cita a M. Cocquilhat [11] como pionero en publicar un estudio relacionado al corte de los metales, en función a la energía consumida y sus efectos en el proceso. Posteriormente son I. Time y Tresca quienes describen por primera vez el concepto de viruta, identificándola como aquel material desprendido a través del proceso de deformación plástica, previamente influenciado por la profundidad de corte, y cuyas aportaciones fueron publicadas por Mallock [12]. Éste centra su investigación en la geometría de la viruta y su relación con las fuerzas de corte con diversos materiales, logrando establecer modelos matemáticos relacionados con el proceso de cizallamiento en la zona de corte e identificando los factores de influencia que conlleva la inestabilidad del proceso, dando origen a la teoría sobre la formación de la viruta por el proceso de cizallamiento, causado por la fricción de la herramienta y los efectos de los lubricantes durante el proceso de corte. El estudio de Mallock fue base para el desarrollo tecnológico durante la denominada era del acero.

No obstante, a principios del siglo XX surge un mayor interés por determinar la eficacia de la herramienta de corte y las fuerzas emitidas durante el mecanizado. Tal es el caso las investigaciones realizados por F.W. Taylor [13], quien logra determinar, mediante ensayos empíricos, un modelo matemático que permite caracterizar el desgaste generado en la herramienta durante el proceso de mecanizado aplicado al uso de herramientas de acero rápido, permitiendo comprobar la eficiencia del mecanizado e impulsando el desarrollo de nuevos materiales para la industria metalúrgica. En este mismo periodo, desataca el trabajo realizado por Ernst en conjunto con Merchant [14] mediante el análisis del mecanismo de corte a través del estado morfológico de la viruta, en correlación a los efectos en la superficie mecanizada.

Continuando con la reseña, la mayoría de los investigadores destacan la aportación de gran interés, relacionada con la teoría de la plasticidad, realizada por Lee y Shaffer, en los inicios de los años 50 del pasado siglo. Ambos establecen la relación de ángulo de cizalladura en la viruta con la herramienta de corte mediante la longitud de contacto [15]. Posteriormente Palmer y Oxel, proponen una nueva teoría en la zona de cizalladura. En esa misma época, Pijsanen, realizó el primer estudio detallado sobre el mecanismo de formación de la viruta mediante el uso de técnicas de observación (microscópica a gran escala), permitiendo caracterizar la variación morfológica de la viruta con respecto a la velocidad de corte, estableciendo su propia teoría, conocida como plano de deslizamiento, la cual se analizará a lo largo de esta tesis [16].

Avanzando en la presente línea del tiempo, se destacan estudios relativos a la influencia del mecanismo de formación de viruta bajo diversos escenarios de corte, uno de los cuales fue realizado por Stabler [17], mediante la investigación relacionada con el corte oblicuo. A su vez, Shaw [18] publicó unos de los primeros análisis tridimensionales de las operaciones de corte, incluyendo el mecanismo de formación de la viruta.

Otro hallazgo fue aportado por M. Kronenberg en 1966, demostrando la correlación de la viruta y algunos parámetros tecnológicos, tales como la velocidad de corte, profundidad y velocidad de avance, en relación a los efectos encontrados en la herramienta de corte durante el proceso de molienda (rectificado). Posteriormente, el científico Van Turkovich aportó nuevas ideas en la formación de la viruta donde intervienen las propiedades de los materiales a mecanizar [19, 20]. En este periodo surge otra alternativa de estudio, propuesta por L. De Chiffre [21], que permite describir la mecánica de corte ortogonal mediante el factor de recalcado, desarrollando un modelo matemático donde involucra tres mecanismos diferentes, para tener en cuenta para la lubricación en la zona de corte, a la vez que propone una longitud de contacto reducida en la zona de contacto herramienta y viruta, basándose en otros modelos, entre los que destaca el de Merchant .

Tras este periodo, surge la era de la informática (siglo XXI), en la que la digitalización experimentó un enorme cambio, reflejado en los avances tecnológicos a nivel global. En lo que corresponde al proceso de mecanizado, ésta permitió incorporar maquinaria con control numérico capaz de realizar operaciones complejas, con la finalidad de mejorar la superficie mecanizada. Al mismo tiempo, se desarrollaron programas de simulación por ordenador, cuyas contribuciones lograron evaluar y comprender con mayor amplitud el comportamiento de los materiales tanto durante su diseño como en su conformado, mediante el uso de software sofisticados capaces de determinar modelos numéricos, los cuales permiten reproducir comportamientos estructurales complejos; un ejemplo es el uso de métodos como el de elementos finitos (FEA, *Finite Element Analysis*).

A partir de las últimas tres décadas, el análisis de la viruta se ha intensificado a tal grado que forma parte esencial en el diseño de fabricación de todo componente metálico [22]. Incluso se considera el control de la viruta como criterio de maquinabilidad de igual importancia que la vida de la herramienta de corte, lográndose



vincular las propiedades de deformación plástica del material de trabajo y a su vez predecir la continuidad del proceso, gracias a las contribuciones de Young & Hooke, quienes han propuesto nuevas teorías de elasticidad mediante ensayos empíricos con diversos materiales.

Hoy en día, existen numerosas teorías que compaginan el mecanismo del corte en metal con la morfología de la viruta, las cuales se citan de forma breve. Así, la Universidad Tecnológica de Opole, Polonia [23], ha realizado un estudio en el que refleja los efectos de diversas herramientas de corte empleadas en el mecanizado de componentes de acero. En dicha investigación se logran identificar y relacionar las variables principales que influyen en la formación de la viruta así como la influencia de las fuerzas de corte y la energía de consumo en el proceso en relación al espesor de la viruta. Sus resultados han sido evaluados mediante la técnica de elementos finitos. También han desarrollado una serie de observaciones que enfatizan la propagación y causas de las distintas etapas que sufre la viruta. Otros puntos primordiales de estudio están centralizados en caracterizar el criterio de cizallamiento y la comparación con otros modelos conocidos a lo largo del tiempo; tal es el caso del modelo de Shaw, que involucra la relación a la profundidad y su velocidad de corte, así como también los ángulos de ataque de la herramienta que tienen un efecto considerable sobre el mecanismo de formación de viruta.

Otros estudios enfocan su atención por trasladar el concepto morfológico de la viruta a otras operaciones propias del mecanizado con fines distintos al conformado de un producto. Tal es el caso del Instituto Tecnológico de Georgia y la Universidad de Berkeley [24]; ambas investigan la formación de la viruta y su complejidad de estudio en el proceso de taladrado.

Por otro lado, considerando como caso aislado al mecanizado de materiales metálicos, se identifican los estudios realizados por el grupo de investigación de la Universidad de Nottingham [25]. Aplicando el concepto morfológico de la viruta a nuevas técnicas para diseccionar huesos humanos, aportan nuevos diseños en herramientas que permitan optimizar el proceso de cirugía y consideran el mecanismo de formación de la viruta en relación a las fibras ósea.

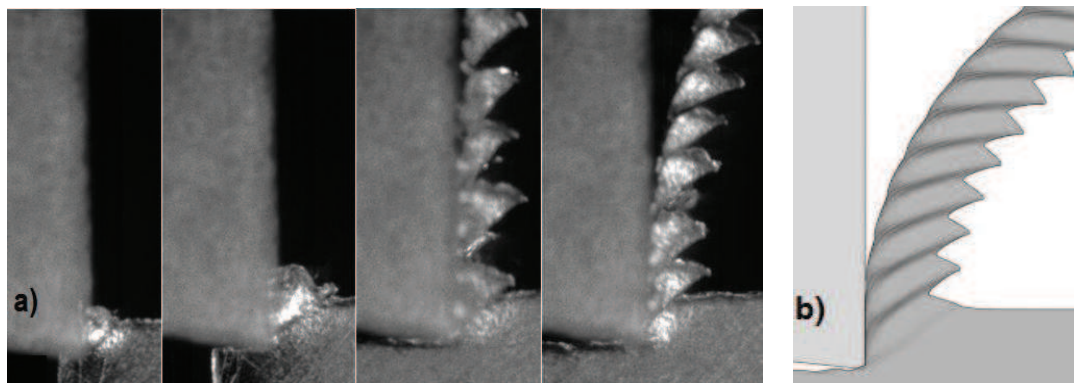
Conjuntando el tema inicial de este capítulo y la esencia que conlleva esta tesis doctoral, se identifican igualmente una serie de observaciones relacionadas a la caracterización del mecanizado con aleaciones ligeras en relación con el mecanismo de formación de la viruta. En este apartado destaca R. Komandurir [26], cuyos estudios han identificado los aspectos que influyen en el mecanismo de formación de viruta (en este caso con aleaciones con base de titanio) bajo diversas velocidades de corte y en los que, a su vez, se analiza la influencia sobre el incremento de temperatura en la herramienta de corte; en ellos se destaca también la importancia por conocer los ángulos de corte y el espesor de la viruta. Estos estudios han dado pie al desarrollo de otras investigaciones, como las de la Universidad de Manchester [27], en la que se analiza la demanda tecnológica en la fabricación de microcomponentes mediante el microfresado con aleación Ti6Al4V, planteando una serie de técnicas para el análisis a distintos parámetros de corte y sus efectos. Con estas técnicas se permite

visualizar la variación de grano de la pieza y cuantificar los efectos del mecanizado en relación a su viruta.

Continuando con las directrices sobre la morfología de la viruta se pueden señalar la investigación de la Universidad de Michigan [28], la Universidad de Rutgers [29], así como también la Universidad de Bordeaux [30]. Las tres determinan un panorama genérico en cuanto a la importancia por plasmar los resultados experimentados mediante técnicas de simulación (utilizando software comerciales tales como AdvantEdge, DEFORM, entre otros) para el análisis tridimensional del proceso de mecanizado con aleaciones de titanio, identificando la relación de la segmentación de la viruta y las características particulares del mecanizado, la cual permite determinar la termodinámica del proceso.

## 2.4 Mecanismos de formación de la viruta

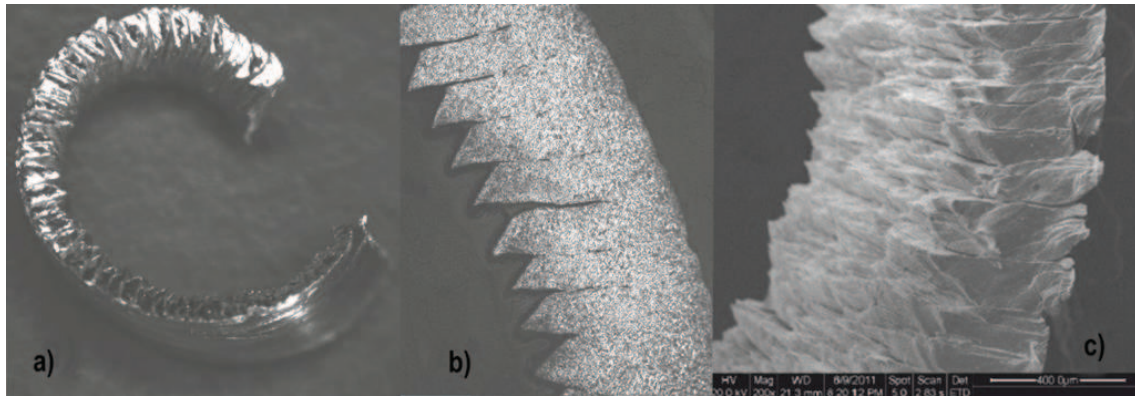
Las referencias anteriormente expuestas concluyen que el mecanismo de formación de viruta se desarrolla mediante un proceso de cizalladura (deformación plástica) del material, generado a partir de una comprensión que se propaga por delante de la herramienta de corte y que se desplaza por encima de la pieza, creando una zona de corte y dando como resultado el desprendimiento de material conocido como viruta (Figura 2.5).



**Figura 2.5** a) Fotograma del mecanismo de formación de viruta. Adaptada de [31], b) Viruta visualizada por técnica FEA.

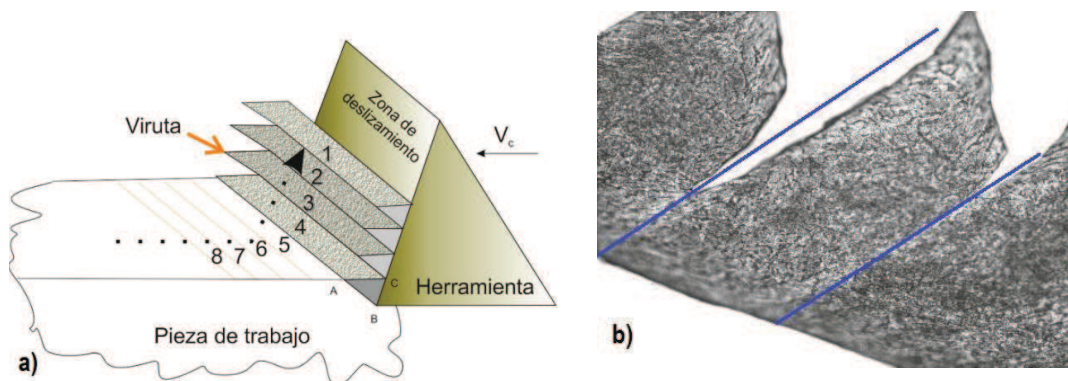
Considerando la Figura 2.5 a), se observa el mecanismo de formación de la viruta en la punta de la herramienta, representado por estrechas bandas de cizalladura, las cuales, en su conjunto, forman una estructura laminar de forma compacta que aumenta, con el transcurso del tiempo, en función de los parámetros de corte. Por su parte, en la Figura 2.5 b) se observa una representación del mecanismo de formación de la viruta mediante técnicas de simulación por elementos finitos.

Dado que el objetivo de este apartado es el análisis del mecanismo de formación de la viruta, es preciso identificar el mecanismo de la viruta en función de cómo se produce el corte y cuál es la geometría resultante de dicha viruta. Es decir, cómo afecta a la configuración geométrica de la viruta las condiciones de corte y del material a mecanizar. Un ejemplo de ello se observa en la Figura 2.6.



**Figura 2.6** Análisis de viruta bajo diversas técnicas; a) y b) SOM (Microscopía Óptica Estereoscópica), c) SEM (Microscopía electrónica de barrido). Adaptada de [2].

Las imágenes de la viruta, obtenida por distintos métodos, permiten identificar el aspecto físico de la misma. Posteriormente, sus resultados serán caracterizados por modelos matemáticos aplicados a la teoría de corte. Entre estas modelizaciones destaca la desarrollada por Pijspanen, mediante un modelo geométrico simple llamado “Deck of Cards” ó “barajas de carta”, que puede ser simbolizado por placas sobrepuestas y desplazadas una sobre otra (bandas de deformación adiabáticas), con superficies de igual tamaño, las cuales conforman la viruta [32, 33], Figura 2.7.

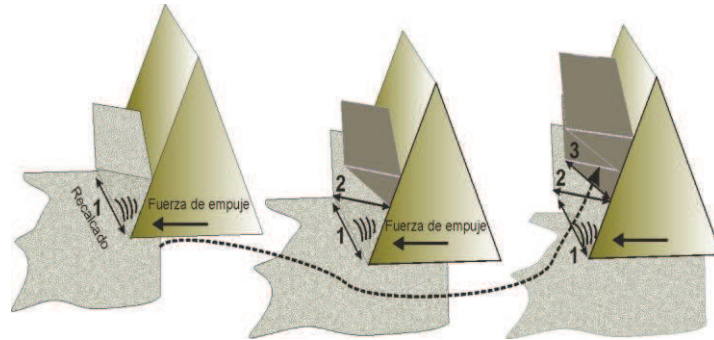


**Figura 2.7** a) Modelo sobre el mecanizado de viruta. Adaptada en [16], b) banda de deformación en viruta segmentada [34].

Se observa, en la Figura 2.7 a), la descripción del modelo propuesto por Pijspanen, que sirve como base para comprender, de forma general, la creación de la viruta. Sin embargo, en la actualidad existen diversos modelos que involucran otras variables que complementan aún más dicho mecanismo. Sobre este punto, llama la atención tanto las aportaciones de I. Time [15], como las de Ernst en conjunto con Merchant, profundizando en el concepto morfológico de la viruta. En ellas, estos investigadores proponen que el proceso se inicia al contactar la herramienta de corte con la superficie de trabajo y superar el límite de resistencia del material a consecuencia del incremento de la fuerza de contacto, provocando la ruptura de pequeños fragmentos de material de la pieza, que están concentrados en el plano de deslizamiento. Posteriormente, y de forma paulatina, la fuerza decrece dando un nuevo ciclo de formación.



Como se indicó con anterioridad, hoy en día la explicación del mecanismo de formación de la viruta se ha diversificado en varias teorías, mediante modelos matemáticos verificados a través de ensayos experimentales que, en su mayoría, coinciden en aplicar los conceptos de la teoría de la plasticidad por medio del análisis en la zona de cizalladura. Algunos de esos modelos plantean que el mecanismo de formación de la viruta está dividido en tres fases, de forma similar al planteado por I. Time, tal como se observa en la Figura 2.8.



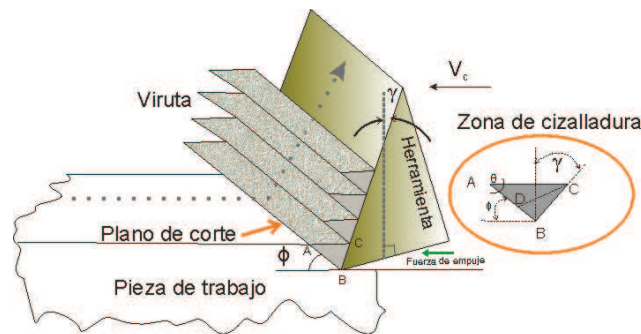
**Figura 2.8** Representación del modelo de Time y Merchant.

La primera fase, donde se genera el efecto de recalcado, ocurre cuando el material se desplaza por el filo de la herramienta, en una zona alrededor del plano de cizalladura debido al estado tensional, generando una grieta inicial en el área de contacto, zona en la que la energía de deformación se convierte en calor y produce un efecto de ablandamiento térmico en el material. Posteriormente, la segunda fase se inicia en la zona de cizalladura, donde el material sufre una deformación y corta una parte de la viruta debido a que el esfuerzo cortante es mayor que la resistencia del material, generando bandas de deformación o placas adiabáticas. Finalmente, la tercera fase tiene lugar debido al desprendimiento de la viruta, como resultado de la tensión generada en ese punto y que dependerá del material que se esté mecanizando mediante una tensión en la zona de corte acompañado de cambios tanto físico y metalúrgico del material.

Cabe mencionar otros modelos de gran interés, como es el caso de Merchant como Stabler, quienes consideran que el proceso de cizalladura se encuentra limitando aproximadamente por el plano de corte y la cara de desprendimiento de la herramienta. En este caso, el plano de corte es denominado plano de cizalladura y el ángulo que éste forma con la superficie mecanizada se denomina ángulo de cizalladura o deslizamiento  $\phi$ ; por consiguiente, la viruta se formará mediante la acción de fuerzas transmitidas en la zona de contacto entre el material y la herramienta mediante un plano de cizalladura. La Figura 2.9 muestra el modelo inspirado por Ernst y Merchant.

Continuando con el análisis del mecanismo de formación de la viruta, se señala igualmente a los investigadores Lee y Shaffer, cuyos estudios se centran en la zona de plastificación durante el corte, formada por dos líneas ortogonales sobre la cara de desprendimiento de la herramienta de corte, como muestra nuevamente la Figura 2.9. En dicha zona se crea una máxima tensión de cizallamiento. A su vez establecen la

hipótesis de que dentro de esa sección existe una zona no deformada (representada por los vértices ABC) generando un ángulo  $\theta$  equivalente a  $\pi/4$  de la línea de corte.



**Figura 2.9** Modelo de formación de viruta propuesto por Ernst y Merchant.

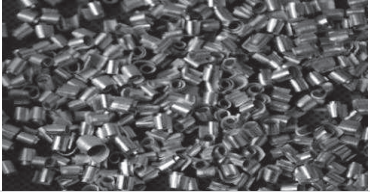
En la actualidad los modelos relacionados con la zona de corte varían según el proceso que se pretende estudiar de forma experimental; es decir, en algunos casos los modelos equivalentes de Merchant ó Pijspanen son empleados en operaciones con altas velocidades de corte, debido a su proximidad a las condiciones reales del proceso en que se considera. Sin embargo, algunos modelos propuestos, como es el caso del investigador Palmer, son utilizados para describir procesos a baja velocidad. De Acuerdo con esto, cabe indicar que las teorías desarrolladas hasta la fecha han planteado la simplificación de dichas hipótesis, en relación con la zona de cizalladura, mediante estudios con pequeñas cantidades de diferentes materiales desprendidos, en relación a la energía de entrada, empleada en la zona de corte con el propósito de mejorar la calidad de vida de la herramienta y la superficie mecanizada para dicho material de trabajo. Se citan, de esta manera, los estudios realizados por Shaw, Cook, Finne y Hill [18, 35], donde se proporcionan distintos cálculos para determinar el ángulo de rozamiento  $\theta$ .

## 2.5 Tipos de la viruta producida durante el mecanizado

La importancia de monitorizar, controlar e identificar la forma de la viruta es un aspecto clave en el mecanizado debido a su gran influencia en la estabilidad del proceso. Por ello, es necesario conocer previamente el mecanismo de formación y, posteriormente, identificar las variables tecnológicas que interfieren en ella, con la intención de asegurar la productividad, calidad y precisión del mecanizado. Existen diversos criterios para clasificar la viruta, uno de los cuales fue planteado inicialmente por Ernst y Merchant [14], considerando 3 tipos de viruta dentro del corte de metal, en función de su forma: continua o en forma de cinta, discontinua y con filo recrecido. Los estudios realizados por Komanduri y Brown [26, 36] aportaron un análisis comparativo realizado durante el mecanizado con aleaciones de titanio y acero. En dichos resultados identifican la importancia por conocer la causa del cambio de temperatura en la zona de corte, así como la relación del ángulo y la velocidad de corte con respecto al espesor de la viruta. Este criterio fue complementado por investigaciones empíricas realizadas por Shaw y Vyas en 1993, para el mecanizado de materiales dúctiles. En este caso se cataloga las tipologías de viruta en: continua (en cinta) y

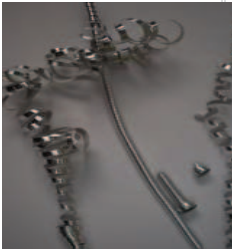
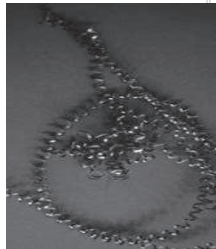
discontinua (que a su vez puede presentarse fragmentada, segmentada e irregular). Esta clasificación es actualmente utilizada de manera orientativa, tal como se muestra en Tabla 2.1, donde resume el tipo de viruta y la situación en la que se pudiese presentar dicha tendencia.

**Tabla 2.1** Tipos de viruta.

Tipo de Viruta		Situación generada
Viruta continua (Cinta)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiales dúctiles o blandos</li> <li>- Rango de velocidades altas o medias</li> <li>- Ángulo de ataque agudo</li> <li>- Zona de cizalla angosta (poca fricción)</li> <li>- Buen acabado superficial</li> <li>- Tendencia a general nidos</li> </ul>
Viruta fragmentada		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiales de dureza media</li> <li>- Rango de velocidad de corte bajas</li> <li>- Elevado avance y profundidad de corte</li> <li>- Tendencia a la vibración</li> <li>- Mal acabado superficial</li> <li>- Cambia la geometría del filo de corte</li> </ul>
Viruta segmentada		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiales con baja conductividad térmica</li> <li>- Alta deformación cortante</li> <li>- Fácil de evacuar</li> <li>- Menor longitud de contacto entre viruta y herramienta</li> <li>- Aspecto de diente de sierra (vista transversal)</li> <li>- Variación en fuerzas de corte</li> </ul>
Viruta irregular		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiales frágiles, impurezas duras e inclusiones</li> <li>- Baja velocidad de corte</li> <li>- Alto rango de profundidad de corte</li> <li>- Ángulo de ataque bajo</li> <li>- Mecanizado en seco</li> </ul>

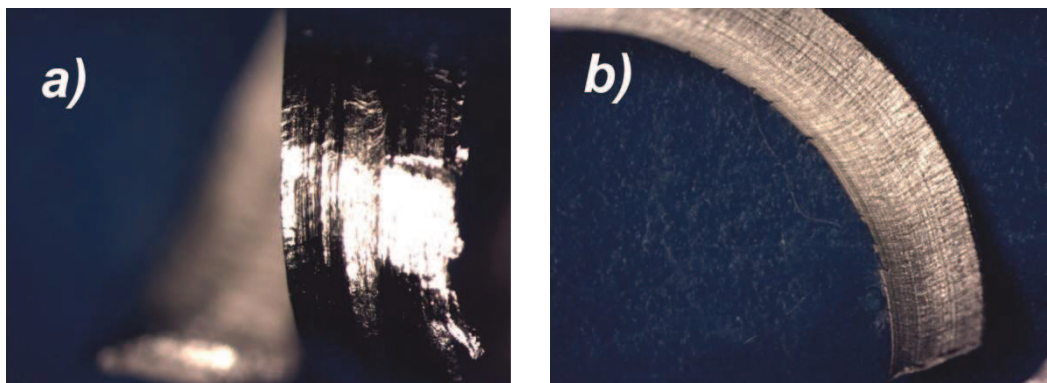
Hoy en día, la clasificación física de la viruta se encuentra estandarizada mediante la norma ISO 3685:1993 anexo G [37], visualizada en la Tabla 2.2, en la que se generalizan los criterios de su apariencia mediante la agrupación en 8 tipologías, cada uno de los cuales se subdivide en función de sus características físicas. Debido a que esta norma no menciona bajo qué regímenes de corte puede manifestarse dicha clasificación, su aplicación es orientativa (ya que no todos los materiales tienden a dichas formas), como es el caso las aleaciones de aluminio [38]. En cuanto al código estandarizado para esta investigación, se ha considerado la siguiente tabla la cual permite visualizar la clasificación de viruta, representada en función de los parámetros de corte ( $V_c$ ,  $f$ ,  $p$ ), el material y la geometría de la herramienta de corte.

**Tabla 2.2** Clasificación de la forma de viruta de acuerdo a la norma ISO 3685:1993 y representada por Boothroyd. Adaptada de [37].

1. Recta	2. Tubular	3. Espiral	4. Helicoidal plana	5. Helicoidal cónica	6. Arqueada	7. Fragmentada	8. Astillada	
								
1.1 Larga	2.1 Larga	3.1 Plana	4.1 Larga	5.1 Larga	6.1 Conectada			
								
1.2 Corta	2.2 Corta	3.2 Cónica	4.2 Corta	5.2 Corta	6.2 Inconexa			
								
1.3 Enredada	2.3 Enredada	3.4 Cortas	4.3 Enredada	5.3 Enredada				



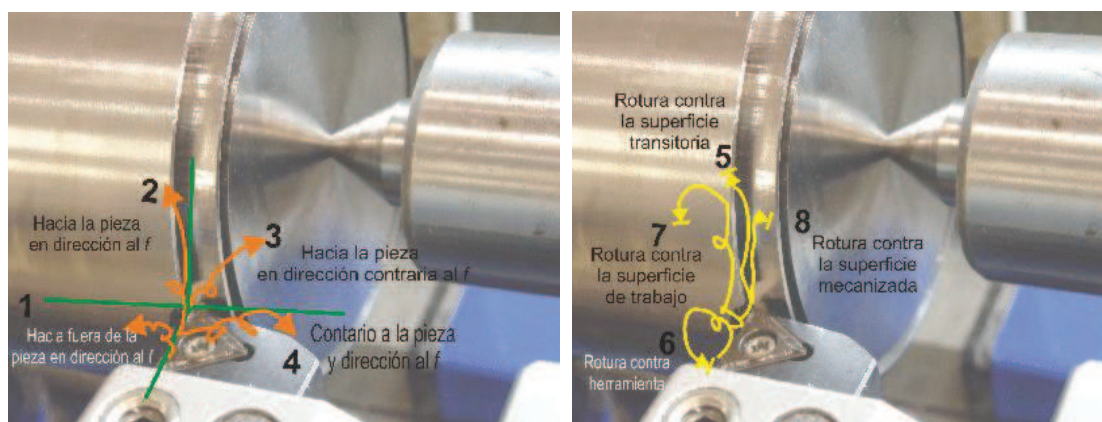
Otro factor de gran importancia es el aspecto físico de la viruta, visualizado de manera macroscópica en la Figura 2.10. Se observa la presencia de dos superficies, distintas una de otra, a consecuencia del proceso de corte. En la imagen 2.10 a) se visualiza en la cara externa un tono brillante con una ligera marca en la zona central de la viruta, debido al rozamiento producido sobre la superficie de desprendimiento de la herramienta y limitada por dos líneas extremas: una dentada por la parte exterior y otra con superficie lisa original de la misma. Se debe a que esta zona se somete a elevadas temperaturas. En cambio, en la Figura 2.10 b) se observa que la cara interna de la viruta posee un aspecto rugoso, opaco y áspero, causado por el propio proceso de corte.



**Figura 2.10** Aspecto de físico de la viruta, a) Cara externa y b) interna.

Conviene indicar que existe otra clasificación, propuesta por I.S. Jawahir [39], en la que se introduce el concepto de maquinabilidad del material mediante un análisis geométrico de la forma de la viruta. Sin embargo, esta última sólo se aplica a ciertos materiales.

De acuerdo con los requerimientos de la normativa expuesta con anterioridad, existe un segundo criterio de gran influencia conocido como flujo de evaluación o dirección de salida de la viruta y su tendencia de rotura, esquematizado en la Figura 2.11.



**Figura 2.11** Clasificación de salida y rotura de la viruta. Adaptada de [37].

Este último criterio es aplicable en todas las operaciones de corte, tanto en metales como en materiales no metálicos. Como las virutas resultantes desarrollan una

curvatura en el momento de su desprendimiento, tal y como se indican en estudios como los realizados por K. Nakayama [40, 41], cabe determinar la dirección de giro de la viruta durante el desprendimiento de diversos materiales. Las posibles razones de dicho efecto se encuentran relacionadas con los esfuerzos generados en la zona de corte y, por consiguiente, sus efectos térmicos, sin descartar la geometría, las condiciones de corte y las características del material.

Posteriormente, la Universidad de Hong Kong desarrolló un análisis matemático exhaustivo bidimensional, relacionado con la forma de la viruta durante el corte de metales, basando en los resultados obtenidos por K. Nakayama [42]. En él se establece una serie de hipótesis (en este caso 6) basadas en la trayectoria helicoidal que presenta la viruta durante el corte, bajo ciertos parámetros de estudio (ángulo de incidencia, radio de la viruta antes y después de ser evacuada, velocidad de corte). Ambas investigaciones se encuentran relacionadas con la geometría de la herramienta (con ó sin rompeviruta) y su influencia en la zona de corte y la dirección que adquiere la viruta durante su evacuación.

Llama también la atención un tercer criterio, a considerar dentro de las características generales de la viruta, como es su color (criterio poco frecuente). Sin embargo, existen estudios que relacionan este factor, tal es el caso de Venkatesh [43], quién observa la variación de tonos en el material desprendido durante el mecanizado de la aleación AISI 1020 y SAE 4340 (acero). Su tono se encuentra asociado con el cambio de temperatura durante su corte, siendo un ejemplo de ello la viruta con tonalidad azul, que es provocado a temperaturas superiores de 980 °C; en cambio, la viruta con tonalidad dorada se originan a temperaturas en torno a 880 °C. Estas observaciones fueron realizadas mediante el uso de técnicas de digitalización de imágenes. Sin embargo, este criterio en la actualidad es poco utilizado.

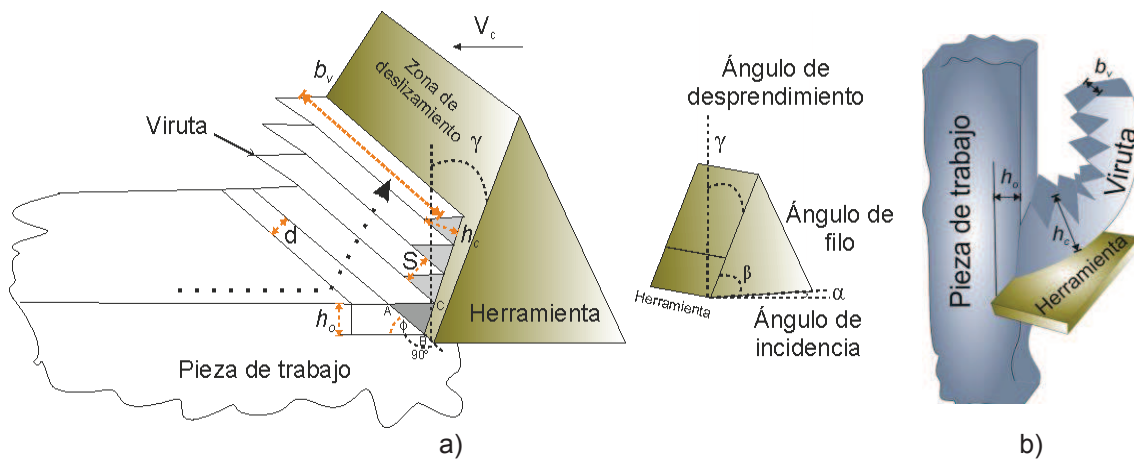
## **2.6 Geometría de la viruta en base al tipo de corte**

La geometría de corte depende de la elección del material de la herramienta empleada, de las propiedades mecánicas de la pieza y, sobre todo, de los parámetros tecnológicos empleados para su mecanizado.

Ahora bien, la geometría de corte está relacionada con la dirección de la velocidad de corte, pudiéndose estar dispuesto el filo de la herramienta de forma ortogonal u oblicuo. En general, los procesos de mecanizado siguen el modelo de corte oblicuo, aunque en la práctica es frecuente considerar el modelo de corte ortogonal pues dispone de un modelo simplificado del mecanizado, despreciando en la mayoría de los casos la complejidad geométrica, a la vez que describe con buena precisión la mecánica de las operaciones de corte.

Por tal motivo, esta investigación considerará un caso real bajo diversas condiciones y con aproximación cercana al corte ortogonal.

Para ello, es necesario identificar las variables geométricas que predominan en la viruta, en este caso de tipo segmentada con forma de sierra, y los factores que repercuten en ella, Figura 2.12.

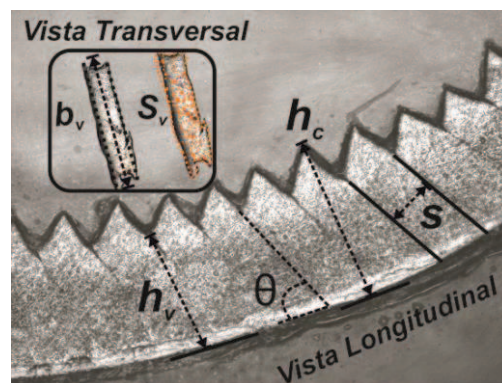


**Figura 2.12** a) Esquema de la viruta en el corte ortogonal, b) Aproximación de corte en la operación de torneado.

En el esquema se identifica que la viruta fluye simétricamente respecto al filo de corte, movida a la velocidad de empuje de la herramienta. A su vez, es posible distinguir diversos aspectos geométricos de la viruta que se encuentran influenciados por algunos factores tecnológicos detallados de forma individual. Parte de ellos se visualizan en la Figura 2.12 a). En cambio la Figura 2.12 b) se muestra la representación geométrica del corte en el torneado de una pieza tubular.

## 2.7 Aspectos geométricos de la viruta

Los aspectos geométricos de la viruta aparecen considerados como un aspecto esencial en la caracterización del mecanizado. Por ello, existen múltiples estudios relacionados con el tema. De entre ellos, en esta tesis se han considerado especialmente las publicaciones [34, 35, 39, 44-47]. En la Figura 2.13 se representa, de manera resumida, la geometría de la viruta de tipo segmentada, conocida por su forma de dientes de sierra, obtenida durante el mecanizado en aleaciones con alta deformación al corte.



**Figura 2.13** Aspectos geométricos de la viruta en vista trasversal y longitudinal.

Las observaciones derivadas en la Figura 2.13 indican que es posible visualizar microscópicamente la viruta en dos orientaciones:

- En la vista longitudinal se identifican parámetros tan importantes como la altura de cresta  $h_c$ , la altura de valle  $h_v$ , la sección de viruta  $S$ , el ángulo de deslizamiento o cizalla  $\phi$ .
- En la vista transversal se identifica  $b_v$ , que representa el ancho de la viruta, y  $S_v$ , correspondiente a su área, por mencionar los más destacados. A partir de estos parámetros es posible conocer de forma indirecta otros parámetros geométricos de interés, como el factor de recalcado  $\zeta$ , el grado de segmentación  $G_s$ , habitualmente empleados en la caracterización del mecanismo de formación de la viruta.

### 2.7.1 *Altura de cresta de la viruta, $h_c$*

El valor de  $h_c$  representa el espesor del material eliminado (viruta) después de haber sufrido la deformación plástica. El valor del espesor de viruta depende del ángulo del filo de la herramienta  $K_r$ , de acuerdo con la relación establecida entre el avance y la longitud de corte, pero siempre será mayor que el espesor inicial del material antes de ser cortado  $h_o$ , que a su vez está relacionado con el avance del proceso  $f$ . Este valor puede ser calculado mediante la siguiente fórmula:

$$h_o = f \cdot \sin K_r \quad (2.1)$$

Donde  $K_r$  es el ángulo del filo de la herramienta.

Por tanto, conocer la altura de cresta nos permite identificar la influencia con respecto a  $f$ . Acentuando esta observación, se concluye que el incremento de altura se verá afectada con el aumento de  $f$ ; Por el contrario, con bajos rangos de  $f$ , tiende a disminuir su valor.

### 2.7.2 *Altura de valle de la viruta, $h_v$*

Este parámetro permite identificar la inestabilidad termoplástica del corte en función de la diferencia de altura, tanto de cresta como de valle. Dicha medida permitirá visualizar el inicio y fin de las placas laminares que conforman la viruta.

Este concepto fue propuesto por A. Gente [48], quien menciona que existe una secuencia repetitiva que se inicia cuando el filo de herramienta penetra la pieza a mecanizar, causando una alteración mediante el desprendimiento o agrietamiento de material en forma de banda de corte; y, al ser empujado, genera otra capa similar a la anterior. El identificar cada etapa de esta secuencia permitirá comprender el concepto de segmentación en el mecanismo de formación de la viruta.

En conjunto, las variables  $h_o$  y  $h_v$  permiten determinar el espesor de la viruta,  $t_v$ .



$$t_v = \frac{(h_o - h_v)}{2} \quad (2.2)$$

### 2.7.3 Sección de la viruta, $S$

Como se indicó con anterioridad, las bandas de deformación constituyen una serie de placas paralelas que se deslizan una contra otra, formando la viruta. Ésta deformación se localiza frente a la cara de desprendimiento de la herramienta de corte, en la que el cizallamiento se concentra en una zona alrededor del plano de corte, de forma que la energía de deformación se convierte en calor, causando un efecto de ablandamiento térmico en el material.

Debido a este ablandamiento, se produce una disminución de la resistencia a la deformación en ese plano, incluso a velocidades de corte bajas, ya que el calor de la deformación no se trasladado al resto del material. Se favorece la deformación localizada en una zona casi plana; y la herramienta avanza de forma continua hasta formar un segmento de viruta. Desde aquí comienza a repetirse el fenómeno de forma sucesiva.

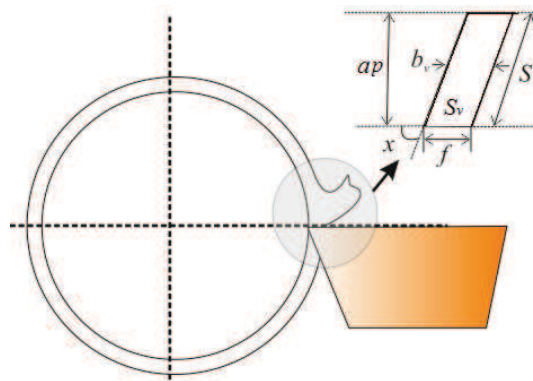
De esta forma, los parámetros característicos de la sección son la profundidad de corte  $p$  (o  $ap$ ), el avance  $f$ , la anchura  $b$  y el espesor de la viruta antes del corte  $h_o$ ; y su comportamiento dependerá del ángulo de filo de la herramienta. Puede ser representada mediante las siguientes ecuaciones.

$$S = \frac{ap}{\sin K_r} \quad (2.3)$$

$$S_o = f \times ap \quad (2.4)$$

$$S_o = \frac{b \times h}{\sin \phi} \quad (2.5)$$

Donde  $S_o$  representa la sección de la viruta antes de ser cortada, considerando los valores de paramétricos de corte. Tal como se observa en la Figura 2.14.



**Figura 2.14** Vista a detalle de la zona de corte.

Algunos autores indican que este parámetro está íntimamente relacionado a  $f$  y es independiente de  $V_c$ , pero dependerá de  $ap$ . Esto demuestra que al aumentar  $ap$  se produce mayor distancia entre los planos de cizalladura ó distancia entre valles. Un dato de gran interés es el aumento de dichas bandas ó secciones, que causan ciertas oscilaciones en los valores de fuerzas de corte y dependerán de la conductividad térmica del material mecanizado.

#### 2.7.4 Ángulo de cizalladura, $\phi$

Anteriormente, se mencionó que, en su mayoría, la formación de la viruta se origina en la zona de contacto de la herramienta con la pieza de trabajo (conocida también como zona de cizallamiento), el cual está comprendido en torno a un plano que lleva su nombre, identificando un ángulo  $\phi$ , donde se manifiesta la deformación plástica del material mediante el deslizamiento de sus átomos a lo largo del plano. Por debajo de este plano se encuentra la pieza sin deformaciones y sobre él, la viruta recién formada.

Existen diversos modelos empíricos donde el valor de  $\phi$  puede variar en un rango orientativo de 10 a 45°, en función del cálculo del ángulo de rozamiento  $\theta$ , mencionado en el punto 2.3. Así, a menor ángulo de cizalladura mayor estabilidad en las condiciones de corte; por ello, es recomendable trabajar con un ángulo de desprendimiento bajo. Además existe una relación del ángulo de cizalladura y el factor de recalcado  $\zeta$  que puede ser calculado mediante la ecuación 2.6.

$$\tan \phi = \frac{\zeta \cos \gamma}{1 - \zeta \sin \gamma} \quad (2.6)$$

Simplificando las ideas de Oxley, Kalpakjian y Piispanen, se puede resumir que el ángulo de cizalladura tiene una gran importancia en la mecánica de las operaciones de corte, influyendo sobre los requisitos de fuerza y de potencia, así como sobre el espesor y la temperatura de la viruta (debido al trabajo de deformación). Sin embargo, existen diversos modelos adaptables según el tipo de mecanizado, citados en su mayoría en [35, 49], los cuales se mencionan a continuación,:

Ernst & Merchant	$\phi = 45^\circ + \frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{2} + \frac{\theta}{2}$	(2.7)
------------------	---	-------

Piispanen, Merchant	$\phi = 45^\circ - \frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2}$	(2.8)
---------------------	--	-------

Stabler	$\phi = 45^\circ - \beta + \frac{\alpha}{2}$	(2.9)
---------	--	-------

Lee y Shaffer	$\phi = 45^\circ - \beta + \alpha$	(2.10)
---------------	------------------------------------	--------

Oxley	$\theta = \phi + \beta - \alpha$	(2.11)
-------	----------------------------------	--------

### 2.7.5 Área de la viruta, $S_v$

El área de la viruta  $S_v$  es la cantidad de material que debe ser arrancado de la pieza en bruto y dependerá del valor de la profundidad de corte  $ap$ , influyendo en la sección de la viruta de manera proporcional: a mayor profundidad, mayor área de corte y mayor cantidad de material a remover.

No obstante, la profundidad de corte no influye en la forma geométrica de la superficie mecanizada y puede ser calculada mediante distintos medios, tal como se detalla en las ecuaciones 2.12 y 2.13.

$$S_v = ap \times f \quad (2.12)$$

$$S_v = S \times b_v \quad (2.13)$$

### 2.7.6 Anchura de la viruta, $b_v$

En el caso del corte ortogonal, la anchura de la viruta  $b_v$ , no modificarse después del corte. Su dimensión corresponde a la longitud efectiva del filo principal y puede calcularse mediante la ecuación 2.14.

$$b_v = \frac{ap}{\sin \chi} \quad (2.14)$$

### 2.7.7 Factor de recalcado o acortamiento de la viruta, $\zeta$

Algunos estudios recientes identifican que el factor de recalcado o acortamiento de la viruta  $\zeta$  proporciona información adicional de parámetros relacionados con el proceso de corte, como es el caso de la recuperación elástica de la viruta o la energía disipada durante la fricción de la viruta y la herramienta [31, 50]. Por lo tanto, este factor está relacionado con la fuerza de corte necesaria para realizar el mecanizado. Valores elevados de  $\zeta$  (próximos a la unidad) implican una baja tendencia a la compresión longitudinal de la viruta (se encuentra definido como el cociente entre la longitud de viruta formada  $l_v$  y la del material sin mecanizar indeformada  $l_o$ ). Este factor es indicativo del grado de deformación de la viruta.

$$\zeta = \frac{l_v}{l_o} \quad (2.15)$$

Admitiendo que las tensiones laterales no provocan deformaciones de la viruta en ese sentido, puede suponerse que la compresión longitudinal de ésta implica una expansión del espesor medio; sin embargo, de esta forma de expresión es poco usual. Por ello, existe otros medios indirectos que permiten determinar el valor de  $\zeta$  a través de la medición del ángulo de cizalladura o mediante el cociente entre los espesores de la viruta antes y después del corte, haciendo uso de las ecuaciones siguientes:

$$\zeta = \frac{h_o}{h_c} \quad (2.16)$$

$$\zeta = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \quad (2.17)$$

Dónde  $\gamma$  es el ángulo de desprendimiento, que depende de la posición relativa de la pieza y la herramienta de corte.

Ello conlleva que la relación de compresión de la viruta siempre es próximo a la unidad debido a que  $h_o$  será menor o igual que  $h_c$ .

### 2.7.8 Grado de segmentación, $G_s$

El grado de segmentación  $G_s$  es el parámetro que determina la variación de la conductividad térmica del material durante el corte y se representa por la ecuación 2.18. Este valor permite identificar el momento de transición de la forma viruta de continua a serrada ó segmentada. En este caso está ligado con el valor de  $S_v$ .

$$G_s = \frac{h_o - h_v}{h_o} \quad (2.18)$$

Este criterio es utilizado para determinar la influencia de  $V_c$  y  $ap$  durante el proceso de corte. Algunos estudios emplean este parámetro de forma orientativa. Un ejemplo de ello es realizado por H. Schulz [51], en el que aplica este criterio a un mecanizado de alta velocidad en ciertos materiales ligeros (aleaciones con base aluminio); en dicha investigación se identifica su influencia tanto en la velocidad como profundidad de corte con respecto a las fuerzas de corte obtenidas, ambas, relacionadas con el grado de segmentación de la viruta.

## 2.8 Factores de influencia en la viruta

Tal como se ha indicado al inicio de este capítulo, se vuelve a subrayar la importancia de conocer los factores de mayor influencia durante el mecanismo de formación de viruta.

Tradicionalmente, para evaluar el mecanizado de un material es considerado los criterios de la vida de la herramienta de corte; fuerzas como potencia de corte y rugosidad, entre otras. Sin embargo, existe un nuevo criterio a considerar sobre el control de la viruta en términos de maquinabilidad inspirado por los trabajos realizados por I. S. Jawahir [39], constituido por 6 variables principales que influyen entre sí, mostrando características cualitativas, a escalas aceptables, relacionadas con el control y formación de la viruta, las cuales se mencionan a continuación.

### 2.8.1 Propiedades del material a mecanizar

Las propiedades, tanto mecánicas como químicas, de la pieza a mecanizar juegan un papel crucial en el proceso de corte. Sin embargo, la mayoría de los estudios existentes en el área de mecanizado coinciden en que no es sencillo predecir su

comportamiento debido a que existen factores ajenos que inciden sobre él. Hoy en día se emplea un concepto que permite caracterizar el comportamiento de un determinado material, que es conocido como maquinabilidad.

Este concepto se emplea para describir la aptitud del material para ser mecanizado. Sin embargo, este término presenta una ambigüedad debido a que no existe un valor absoluto concreto que cuantifique la maquinabilidad de todo material, dado que puede interpretarse de muy variadas formas [52].

Con objeto de evaluar el comportamiento del material durante el proceso de corte, se deberán tener en cuenta tres aspectos de gran importancia: la composición química, debido a que puede reducir su capacidad a ser mecanizado a causa de la presencia de elementos aleados (Cr, Co, Ni, V, etc.) que podrían modificar las propiedades físicas del material en cuestión, la estructura del material (tamaño y orientación de granos) y, por último, el comportamiento térmico a partir de la conductividad térmica o bien mediante el incremento de temperatura.

La gran complejidad de este tema obliga a considerar las experiencias que se han realizado sobre el comportamiento de ciertos materiales, bajo condiciones de trabajo habitualmente utilizados a nivel industrial, destacando las aportaciones de la compañía comercial Sandvik Coromant [53], en las que se ha simplificado el comportamiento de ciertos materiales bajo un código estándar que identifica tres aspectos que determinan la maquinabilidad de cada familia (integrando a su vez el tipo de viruta que suele formar): tipo del material (mecánico y metalúrgico), geometría de filo y material de la herramienta de corte.

No obstante, para esta tesis, el término de maquinabilidad será utilizado para describir el comportamiento de cierta aleación ligera (*Ti6Al4V*) durante su mecanizado a través del análisis morfológico de la viruta bajo diversos escenarios de corte.

### 2.8.2 Parámetros tecnológicos de corte

Para ejecutar cualquier operación de corte se requieren ciertos movimientos esenciales que permitan conformar un objeto. Uno de ellos es el movimiento relativo de la herramienta de trabajo frente a la pieza conocido como avance  $f$ ; otro es el desplazamiento que recorre la herramienta de corte para que penetre en la superficie mecanizada, que se conoce como profundidad de corte  $p$  ó  $ap$ . Por último, se encuentra el movimiento principal o de corte, cuya velocidad se denomina, homónimamente, velocidad de corte  $V_c$ , que es la velocidad lineal relativa a la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte.

A lo largo de este capítulo se trata el grado de influencia de ciertos factores críticos que influyen en la formación de la viruta, entre ellos los aspectos tecnológicos. Por este motivo, se va a analizar la influencia particular de cada uno de ellos, con el objetivo de lograr una combinación óptima entre la capacidad de la máquina y los

valores de los parámetros tecnológicos de corte ( $f$ ,  $V_c$  y  $ap$ ), proporcionando un equilibrio entre el coste de la herramienta, la fiabilidad y productividad del proceso.

#### 2.8.2.1 Avance, $f$

Este parámetro se encuentra condicionado por el tipo de herramienta empleada para realizar el corte, la precisión dimensional requerida y, en base a ella, la cantidad de material removido. El avance por pasada o vuelta de corte se podría expresar como la cantidad de material que debe ser eliminado a medida que avanza la herramienta dentro de la pieza de trabajo, estando, por ello, relacionado con el espesor de la viruta.

Independientemente de esto, es un parámetro que se relaciona de forma directa con la calidad superficial y, por lo tanto, con la vida de la herramienta. En este sentido se subraya la existencia de estudios relacionados con este aspecto, entre ellos los realizados por S. Sun [54] mediante el mecanizado de aleaciones con base de titanio, donde se caracterizara, mediante modelos empíricos, la dependencia de las  $F_c$  en función de  $f$ , observándose el aumento de  $F_c$  a medida que aumenta  $f$ . Esto, a su vez, conlleva a un proceso inestable, que podría provocar el incremento de volumen de viruta, afectando su evacuación. En cambio, si se trabaja con  $f$  bajos y altas  $V_c$ , favorecería las condiciones de trabajo y, a su vez, se obtendría virutas segmentadas.

#### 2.8.2.2 Velocidad de corte, $V_c$

Tanto  $V_c$  como  $f$  son parámetros tecnológicos claves en los procesos de corte por arranque de material, influyendo de manera determinante en el tiempo de mecanizado y, en consecuencia, afectando al rendimiento de la proceso y a la calidad de la superficie deseada.

Dado que al aumentar la velocidad también se incrementa la temperatura en la zona de corte, ocasionando como resultado un mayor desgaste a la herramienta de corte, y reduciendo de forma considerable su vida útil, es de vital importancia una adecuada elección de los rangos de trabajo, en este caso asignados a  $V_c$  y  $f$ . Con velocidades de corte bajas, el tiempo del mecanizado es mayor, mientras que si se trabaja con altas velocidades, se incrementa la temperatura de corte en el filo de la herramienta, provocando posibles daños en ella. Esto supone tiempo y gastos posiblemente innecesarios.

Por otro lado, la velocidad de corte también influye de forma considerable en la morfología de la viruta. Rangos elevados de  $V_c$  ocasionan una tendencia de viruta fragmentada y, por ello, inestabilidad durante el mecanizado e incremento de temperatura, ocasionando baja resistencia a la deformación, así como disminución de la fuerza de corte. Todo lo anterior dependerá de las propiedades del material a mecanizar.

### 2.8.2.3 Profundidad de corte, $p$ o $a_p$

La profundidad de corte es la distancia de penetración de la herramienta (distancia radial) realizada desde la superficie de la pieza a mecanizar en una pasada de corte. Es medida en dirección al avance de la herramienta de corte. Sus valores dependerán de la longitud del filo de trabajo y la cantidad de material por remover. Sin embargo, se identifica que a profundidades de corte excesivamente altas se pueden crear fuerzas que sobrepasan la rigidez estructural de la máquina, provocando niveles de vibración que pueden mermar la calidad superficial de la pieza de trabajo.

### 2.8.3 Herramienta de corte

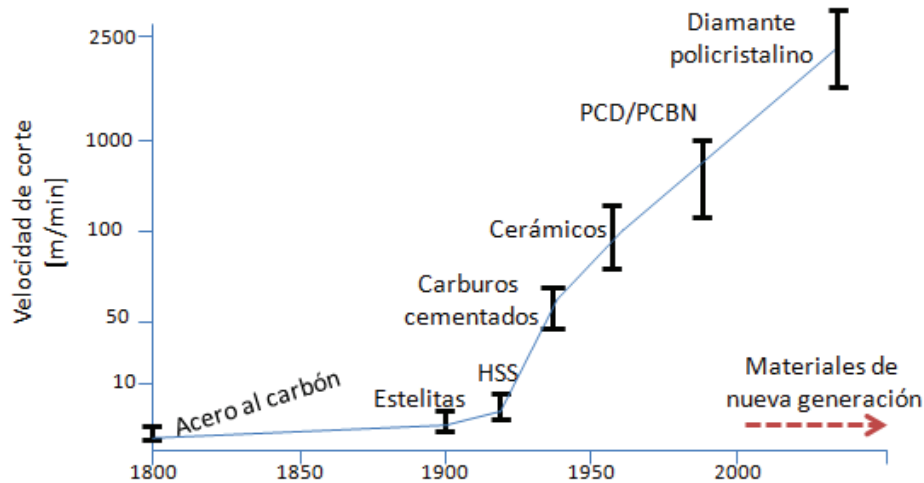
En este apartado se identifica, de forma general, la herramienta y su influencia en el mecanizado. Se describe como herramienta de corte aquel instrumento capaz de modificar de forma paulatina el aspecto de un cuerpo hasta conseguir la configuración deseada. Como es conocido, las herramientas de corte son diseñadas para minimizar el contacto de rozamiento entre la pieza de trabajo durante el mecanizado; por ello, existen una gran variedad de formas que cambian en proporción del tipo de proceso, material, diseño como acabado superficial de la pieza, por mencionar las más principales.

Las herramientas de corte se encuentran diseñadas y estandarizadas por las normas UNE, ISO/DIS 3002, ISO 1832:2004 [55], donde se expone, de forma básica, la geometría de la herramienta de corte para todos los procesos que conlleven el arranque de viruta.

Ahora bien, hay que considerar que las herramientas están sometidas a grandes esfuerzos y altas temperaturas a causa del deslizamiento de la viruta en la cara de ataque o por el deslizamiento de la herramienta por la superficie recién cortada. Por tanto, es importante seleccionar la herramienta de corte adecuada al material a mecanizar. Las herramientas pueden estar protegidas por una membrana - conocida como recubrimiento- que actué como un agente protector entre la pieza de trabajo y la herramienta, disminuyendo los posibles fallos a la que será sometida durante el proceso de corte (resistencia al desgaste, abrasión, formación de cráteres, acumulación de material al filo, resistencia química y reducción de temperaturas).

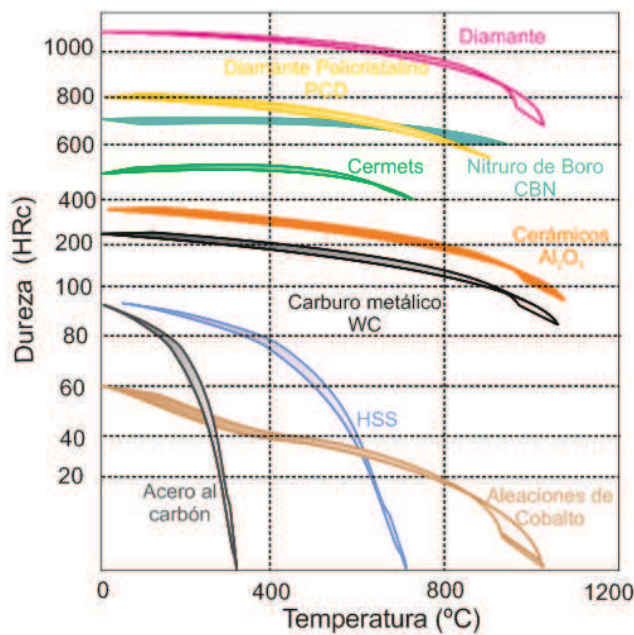
Los materiales más empleados para la fabricación de herramientas de corte han sido: diamante policristalino (PCD), nitruro de boro cubico (CBN), cermets, carburos cementados o sinterizados, aceros rápidos (HSS), aceros al carbón. En la Figura 2.15 se representa la evolución de los materiales empleados en la fabricación de herramientas de corte diseñados en base a sus propiedades mecánicas, físicas y químicas, y que se encuentran enlazados con el desarrollo tecnológico.





**Figura 2.15** Evolución de los materiales y recubrimientos para herramientas de corte [6].

Por otro lado, la Figura 2.16 muestra la relación dureza y temperatura para algunas herramientas de corte. Una mala elección de la herramienta en relación al material de trabajo induce a un posible desgaste de la herramienta, afectando de forma negativa la vida de la misma, calidad de la superficie mecanizada o su posible inexactitud dimensional y, en consecuencia, a la economía de las operaciones de corte.



**Figura 2.16** Evolución de la dureza de las herramientas de corte en función de la temperatura alcanzada en el mecanizado[56].

En la actualidad, los temas relacionados tanto con el diseño como la optimización de la vida de la herramienta se encuentran en continuo desarrollo (geometría, material y recubrimiento). Por ello, numerosos estudios tienen como objetivo conseguir un alto desempeño de la herramienta en intervalos óptimos, manteniendo la precisión dimensional y reduciendo su desgaste y, a su vez, contribuir con el impacto ambiental, asociado a la eliminación del uso de fluidos de corte [57].



### 2.8.4 Desgaste y vida de la herramienta

En este apartado se hablará primordialmente del desempeño óptimo de toda herramienta de corte, identificando los factores que contribuyen al desgaste y vida de la misma, para evitar un fallo progresivo o, en los peores de los casos, el fallo prematuro.

El desgaste puede ser definido como un daño gradual o definitivo en sus propiedades mecánicas, originando la modificación geométrica de un objeto debido al contacto de dos sólidos después de determinadas condiciones de trabajo a los que es sometido durante un tiempo determinado.

Para el cálculo de la vida útil de la herramienta se han desarrollado modelos matemáticos que permiten determinar su desgaste. En su mayoría, fueron obtenidos mediante numerosos ensayos. Uno de ellos fue realizado por F. Taylor [13], que fue el primero en relacionar las condiciones de corte en función a la velocidad y la geometría de la herramienta en un tiempo determinado. El concepto de vida de la herramienta está representado el tiempo que la herramienta mantiene una geometría óptima hasta que ocurre la falla catastrófica durante el proceso de corte o bien alcanza un valor preestablecido del nivel de desgaste progresivo. Este modelo se basa en el cálculo de la velocidad de corte para una duración establecida de la herramienta entre dosafilados consecutivos, considerando los siguientes puntos:

- Condiciones de corte: Parámetros tecnológicos ( $V_c$ ,  $ap$  y  $f$ ).
- Geometría de la herramienta.
- Calidad del material de la herramienta y pieza.
- Criterio de duración o vida de la herramienta: desgaste frontal de la cara de incidencia, profundidad del cráter de la cara de desprendimiento, tolerancias de la pieza.
- Condiciones de trabajo: refrigerante utilizado, medios de fijación de la pieza, potencia y estado de la máquina, tipo de máquina, tipo de operación, etc.

Dando como resultado la ecuación de Taylor, que permite relacionar la vida de una herramienta de corte:

$$V_c \times T^n = C \quad (2.19)$$

Donde,  $V_c$  es la velocidad de corte,  $T$  corresponde a la vida de la herramienta,  $n$  y  $C$  son parámetros cuyo valor depende de condiciones de corte como el  $f$ ,  $ap$ , tipo de material de trabajo, geometría o material de la herramienta de corte, por mencionar alguno. Esto da como resultado cierta dificultad a la hora de aplicar o analizar la ecuación. Por ello, se hace necesario generalizar de forma favorable la ecuación de Taylor a ciertas variables de influencia, tal es el caso de  $f$  y  $ap$  (variables más comunes).

Actualmente, la ecuación 2.19, en versión generalizada, es aplicada en la mayoría de los estudios relacionados con el desgaste o vida de la herramienta de corte.

Una vez identificado el concepto anterior se deduce el desgaste de herramienta y la vida útil de la misma en todo proceso de mecanizado.

Por naturaleza, la herramienta es sometida a distintos escenarios como pueden ser: excesivas temperaturas con efectos corrosivos, sobreesfuerzos por diferencias de propiedades mecánicas de la pieza y de la herramienta, así como también el deslizamiento de viruta o de herramienta en la superficie a mecanizar.

Los principales factores que actúan sobre la herramienta se pueden agrupar en cuatro grupos: mecánico, térmico, químico o abrasivo. Existen clasificaciones de diferentes autores en las que se identifican los principales desgastes que pueden causar el proceso de corte, los cuales se plasman en la Tabla 2.3, con el objetivo de mostrar los posibles efectos en la vida de la herramienta, dentro del proceso de corte.

**Tabla 2.3** Tipos de desgastes en plaquitas de corte.

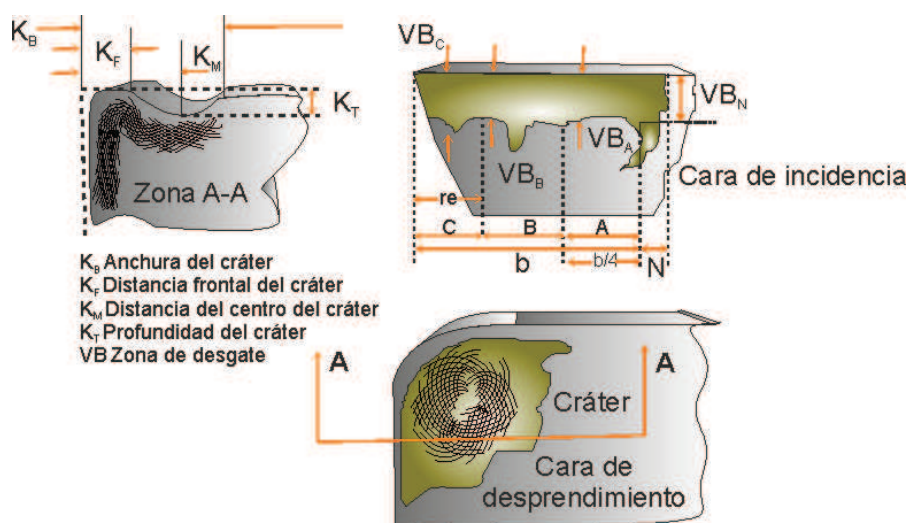
Tipo de desgaste	Breve descripción
	Desgaste de incidencia: es causada por altas velocidades e insuficiente resistencia al desgaste, provocando un mal acabado y el riesgo de rotura del filo de la herramienta.
	Astillamiento: se produce cuando la arista de corte se fisura con mayor rapidez, causando ralladuras en la superficie del material.
	Cráter: por abrasión, debilita el filo; y, por difusión, genera desprendimiento de material de la herramienta, modificando la geometría del corte y una mala formación de viruta
	Fisura: provoca un alto deterioro al filo y puede ser debido a una alta tensión sobre el material de la herramienta, causando cambios en la geometría e incremento la temperatura de la herramienta hasta la destrucción.
	Deformación plástica: es la combinación de altas temperaturas y presión del filo; tiende a presentarse a grandes $f$ y en materiales duros, causando deformación en el corte y desviación de flujo de viruta.
	Por aportación (BUE, Built Up Edge): se presenta material adherido al filo de la herramienta o soldado en la cara de la herramienta, a causa de altas velocidades y temperaturas.
	Bul (Built Up Layer): sucede por la incorporación de material sobre la cara de desprendimiento, por causas termomecánicas.

Finalmente, se concluye que la vida de la herramienta (o su desgaste) dependerá del material y geometría de la herramienta, de los parámetros de corte, condiciones de corte, material a trabajar o el tipo de mecanizado. Es imposible, por tanto, fijar un criterio universal sobre el análisis de la vida de la herramienta ya que es el producto de una combinación de los factores que interactúan sobre el filo de corte y sus parámetros del proceso.

Para este estudio se considera la evaluación del desgaste de la herramienta y su influencia sobre la morfología de la viruta, por la gran relación que existe entre ambas. Grupos de investigación como los de la Universidad de McMaster y la Universidad de Cádiz [58-60] coinciden en que, a pesar de que se especializan en distintos materiales, existe una fuerte relación del espesor de la viruta y la formación inestable de filo aportado conocido como BUE, ocasionado en altas velocidades de corte, dando lugar a un fenómeno de plastificación del material provocado por el incremento de temperatura (se adhiere material al filo principal hasta llegar al filo secundario), originando ligeras marcas en la superficie mecanizada.

Todo lo anterior se encuentra considerado dentro de un marco normativo relacionado con la medida o determinación del desgaste de la herramienta de corte (ISO 3685:1993 [37], ISO 883:2013 [61], ISO 3364:2011 [62], ISO 513:2012 [63], ISO 13399:2006 [64] y UNE 16148:1985 [65]). Dichas normas comparten criterios orientativos que permiten identificar el criterio más adecuado para cada herramienta de corte, basado en resultados experimentales, a través del tiempo de mecanizado en relación con el tipo de material de la herramienta y el tipo de desgaste generado en ella.

Pero cabe mencionar que dichas normas, en algunos casos, no pueden ser aplicadas a los nuevos avances tecnológicos. Actualmente se tiende a utilizar el criterio establecido de la norma ISO 3685:1993 [37] para determinar el desgaste de la herramienta a través la medición de ciertas zonas, visualizado en la Figura 2.17.



**Figura 2.17** Parámetros geométricos para la medición del desgaste.

El diagrama expuesto detalla de forma significativa las longitudes de medida correspondiente al desgaste generado en la cara de incidencia de la herramienta, donde la zona C es equivalente al radio de la punta de la herramienta de corte; la zona B corresponde a la parte central del desgaste, donde se establece un valor para  $VB_{Max}$  de 0,6 mm y para  $VB_B$  de 0,3 mm. Y, finalmente, la sección A-A representa el área de contacto entre la herramienta y la superficie de contacto. El identificar la zona de desgaste permite realizar la medición, y su resultado podrá ser evaluado mediante modelos predictivos. Dicho análisis permitirá comprender, a grandes rasgos, la tendencia que puede presentar dicha herramienta a un determinado tipo de corte en relación al material de trabajo.

### 2.8.5 Maquinaria y operación de trabajo

En los estudios experimentales realizados en esta tesis se ha elegido la operación de torneado, dado que es uno de los procesos industriales básicos y de uso habitual en diversos sectores (aeronáutico, biomecánica, dental, automoción, deportivo, energético, entre otros), por su sencillez y rentabilidad, logrando una fabricación con alta precisión dimensional y calidad superficial de las piezas mecanizadas.

Por otra parte, conviene indicar que la productividad de la operación del corte (en este caso del torneado) depende no solo del equilibrio entre las condiciones de corte y la herramienta de trabajo, sino también en un gran número de variables, una de las cuales es la capacidad de la maquinaria de trabajo. Con referencia a ello, es conveniente determinar los límites de potencia que proporciona la máquina para una aplicación específica, en este caso el corte deseado. Por ello, en esta tesis se han considerado necesario realizar estudios previos del tiempo de arranque de la máquina de trabajo para cada rango de análisis; en este caso se ha empleado un torno convencional modelo Pinacho S-90/180, el cual se detalla en el capítulo 4.

## 2.9 Condiciones de corte vinculadas con el medio ambiente

En los tiempos actuales existen serios problemas ambientales a nivel mundial (a medida que crece la población los recursos naturales van escaseando y alterando el entorno climático). Por esta razón, numerosas industrias se ven obligadas a sensibilizar su compromiso ambiental, dado que forman parte de los principales generadores de contaminantes. Por ello, la industria manufacturera tiene como objetivo equilibrar tanto su sostenibilidad económica como medioambiental mediante la protección y conservación de los recursos naturales, mediante propuestas ecológicas aplicada a su proceso de fabricación.

De esta manera, es conveniente recoger las tendencias relacionadas con el mecanizado por arranque de viruta y su estrecha relación con el impacto ambiental [66-68]. Dichas tendencias forman parte de estudios experimentales relacionados con el tema y logran concluir que para un mecanizado de calidad es necesaria la reducción e incluso eliminación de los fluidos de corte que faciliten el arranque de viruta

(permitiendo reducir la fricción y temperatura en el proceso). Sin embargo, existen ciertos fluidos de corte catalogados como sustancias nocivas para el medio ambiente y el propio usuario.

Es conveniente mencionar que, en base a lo anterior, surgen diversos métodos ó técnicas no agresivos en el mecanizado, actualmente utilizados para dicha operación, brindando un resultado similar al empleo de fluidos de corte (con el objetivo de cumplir con la normativa ecológica, evitando cualquier riesgo físico). Dentro de este marco, se referencia de forma genérica algunos de estos métodos, en los que destacan el uso de refrigerantes de tipo gaseoso, como el dióxido de carbono o el nitrógeno.

Por otro lado, existen diversos materiales que ejercen como lubricantes sólidos, como el grafito y el disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ), que permiten refrigerar la zona de corte, brindando resultados favorables. Otro método óptimo para el corte de los metales sería mediante el uso de enfriamiento con materiales criogénicos (nitrógeno líquido), facilitando el mecanizado mediante la reducción de temperatura pero con un alto riesgo de producir cambios en las propiedades de la herramienta de corte y en la pieza mecanizada. Un caso relacionado a este método es el expuesto por Shoujin Sun [69], según el cual, al mecanizar aleaciones de titanio se observa una cierta mejoría en la vida útil de la herramienta de corte en comparación con el mecanizado en seco.

Otra técnica, conocida como MQL (Minimum quantity lubricant), proporciona una alternativa favorable al mecanizado con flujo controlado de lubricante (0.01-0.5 ml/min). Tanto la herramienta como la superficie de trabajo permanecen relativamente secas, dando a lugar la reducción de costes por la lubricación y tratamiento de residuos, así como los riesgos a la salud de los trabajadores [70]. Existe, a su vez, tres métodos aplicables para este sistema. El primero se realiza a través de la pulverización mediante corriente de aire, mientras que los otros dos sistemas consisten tanto en el uso de dosificadores como de boquillas adaptadas para el transporte de aceite y aire controlado.

Finalmente, se hace mención al mecanizado en seco o ausencia completa del fluido de corte, como una opción viable dentro de la línea de fabricación sostenible; sin embargo, conlleva ciertas limitaciones, entre ellas, el incremento de temperatura en la zona de corte debido a la fricción. Esto implica que, cuando se desempeña un proceso de este tipo, se deben adoptar medidas para que las funciones que normalmente ejerce el fluido sean asumidas por otros medios. La clave para el éxito en el uso de este método obliga a una correcta selección sobre los parámetros de corte en correlación a la geometría de corte y a las dimensiones geométricas establecidas para la pieza de trabajo [60].

Como ejemplo de ello se encuentran los estudios realizados por la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) en colaboración con la Universidad de Cádiz [38, 71]; este trabajo de investigación consistió en el mecanizado en seco de aleaciones de aluminio en las que destaca AA2024 como AA7050 en relación con la morfología de la viruta y la integridad superficial de la pieza de trabajo, logrando identificar los factores de influencia e integrar un diagnóstico dimensional del acabado

superficial de la pieza (lo cual hace posible distinguir el rango de trabajo idóneo para el mecanizado de dicha aleación).

Por lo tanto, retomando la importancia que juegan los parámetros de corte en el mecanismo de formación de viruta, se despliegan numerosas investigaciones que buscan determinar un mecanizado óptimo mediante el análisis y su relación con los parámetros de corte, identificando sus efectos tanto en la pieza de trabajo como en su herramienta. Destacan los investigadores D. Heilmann y Biermann [72], que analizaron la importancia de procesos alternos para la eliminación de virutas y el control en la temperatura de la pieza de trabajo y el filo de corte de la herramienta, evitando un cambio drástico en las propiedades del material y demostrando un alto potencial en la disminución de la formación de viruta. Sus estudios se centraron tanto en el proceso de torneado como fresado, utilizando diversos escenarios de trabajo como: el mecanizado en seco, MQL, CO<sub>2</sub> y emulsión de fluidos, cuyos resultados permiten determinar la viabilidad de cada proceso y adecuarlo, de forma particular, a lo establecido en el diseño del producto, permitiendo identificar las variables críticas que influyen tanto en la formación de la viruta como en su evacuación (tal es el caso de la profundidad de corte).

Por lo tanto, se considera esta investigación como base fundamental para la determinación de los criterios de evaluación en esta tesis doctoral. Es importante indicar que se tiene en consideración analizar el mecanizado en seco. Se busca orientar de manera experimental la importancia por caracterizar el mecanizado de la aleación Ti6Al4V en función con las principales fallas que puedan verse afectadas en la herramienta de corte en relación a los parámetros de corte establecidos; y, a su vez, se tiene en consideración las altas temperaturas en la zona de corte, dando lugar a fenómenos de incorporación de material mecanizado a la herramienta que alteran al mecanismo de formación de la viruta y que, en ocasiones, dificultan su evacuación. Dentro de este marco, la monitorización y control de la viruta es un aspecto a tener en cuenta en la mejora del rendimiento de los procesos de corte.

## 2.10 Transferencia de calor durante el mecanizado

En este punto se analizará la influencia de la temperatura en el proceso de mecanizado. La variación de la temperatura es generada por las fuerzas de corte, que actúan en el mecanizado transformando parte de la energía mecánica en calor.

El conocer la elevación de la temperatura en la zona de corte es de gran importancia. Dicho efecto se encuentra localizado en la interfaz de la herramienta y viruta. Una forma de calcular esta variación de temperatura es aplicando la ecuación de Cook (Ecuación 2.20).

$$\Delta T = \frac{0,4 \times U}{pC} \times \left( \frac{V_c \times b_o}{K} \right)^{0,33} \quad (2.20)$$



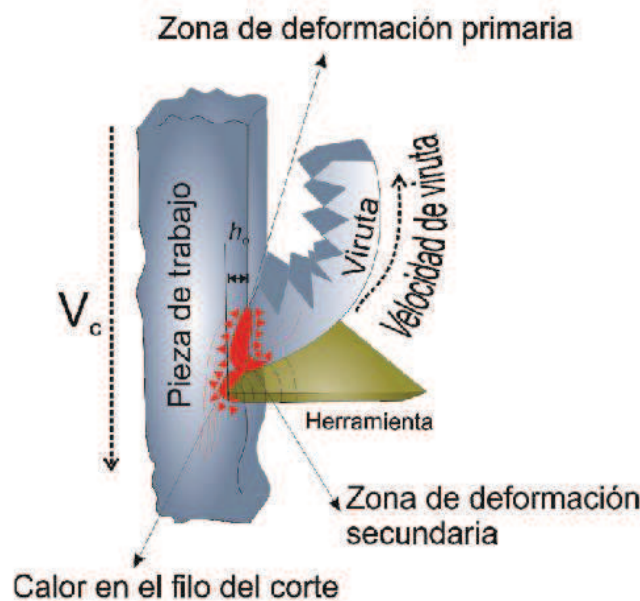
Donde,  $pC$  representa el calor específico volumétrico del material de trabajo, y la constante  $K$  es la difusividad térmica del material. Así, como también  $\Delta T$  conocido como el incremento de la temperatura entre la herramienta y viruta. Finalmente  $U$  es conocida como el valor obtenido de la energía específica para realizar la operación.

Otra forma de calcular la temperatura de forma experimental es mediante la ecuación propuesta por Trigger (Ecuación 2.21).

$$T = K \times V_c^m \quad (2.21)$$

Donde,  $K$  y  $m$  son constantes que dependen del material de trabajo.

Resulta importante indicar que la temperatura en el corte es un hándicap, ya que la potencia consumida en el proceso se verá reflejada en la deformación plástica de la viruta, con gran influencia crítica en la vida útil de la herramienta, generando como consecuencia un acabado no deseado. Igualmente, también pueden afectar las propiedades mecánicas de la pieza. Aunque no se ha considerado el estudio del fenómeno térmico en esta tesis, es necesario identificar las zonas de influencia de calor con relación al proceso, Figura 2.18.



**Figura 2.18** Diagrama de calor durante el mecanizado. Adaptada de [73].

Hay que indicar que en la actualidad se desarrollan métodos experimentales destinados a medir e identificar, mediante diagramas de calor, la temperatura generada durante el proceso de corte, que en su mayoría son respaldadas por técnicas de simulación mediante elementos finitos; destacando, por su sencillez y gran aplicación, el uso de termopares. Otra técnica de uso práctico, pero de coste elevado en comparación con la anterior, es la técnica de radiación infrarroja (pirómetros o cámaras térmicas) o el uso de pinturas termosensibles (esta última menos aplicable en el mecanizado).

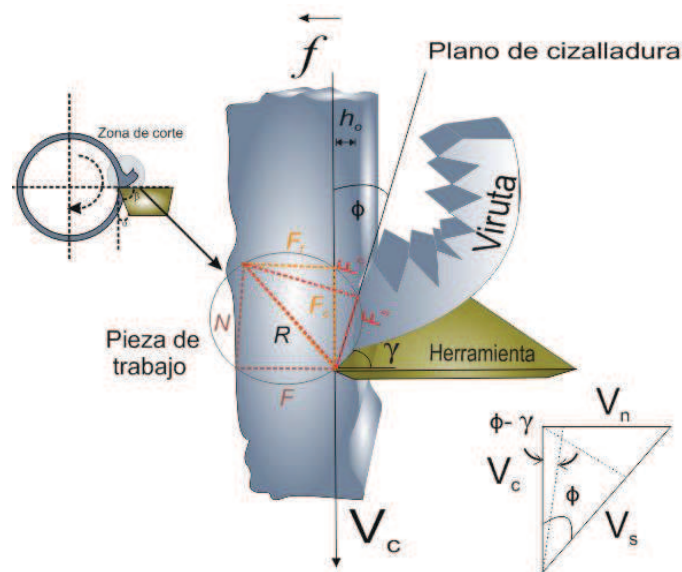
La mayoría de los estudios relacionados con el calor generado en la zona de corte emplean modelos establecidos bajo la hipótesis de corte ortogonal [74]. Como se puede observar en la Figura 2.18, existen tres zonas de concentración calorífica. La más importante tiene su origen en la deformación plástica que tiene lugar en la zona primaria o de cizalladura; su fuente de calor es generada por la fricción entre el material de trabajo y la herramienta de corte. En la zona secundaria, su flujo de calor está causado por el rozamiento entre la viruta y la herramienta (cuyo valor depende de la velocidad de la viruta y su espesor). Por último, la tercera se encuentra en la zona de contacto entre la herramienta y la superficie mecanizada, siendo la menos significativa. Se destaca que en el proceso de corte la máxima temperatura se localiza en la cara de desprendimiento de la herramienta de corte, causada por el rozamiento de la viruta.

## 2.11 Correlación de las fuerzas en el mecanizado

Desde principios del siglo XX se dieron a conocer las primeras publicaciones relacionados al comportamiento de las fuerzas de corte en el mecanizado.

Se identifica que tanto las fuerzas como la potencia de corte juegan un papel crucial para efectuar el mecanizado debido a que todo material opone una resistencia a la rotura, la cual es necesario vencer mediante cierto esfuerzo dinámico (herramienta-pieza), permitiendo remover cierta cantidad de material bajo un determinado rango de velocidad de corte.

Con este apartado se quiere resaltar la importancia de conocer la correlación de las fuerzas de corte durante el proceso de mecanizado, las cuales interactúan de forma directa en la herramienta de corte, viruta y pieza mecanizada mediante la generación de una serie de presiones (sistemas de fuerza) proyectadas en la superficie de la herramienta, tal como se detalla en la Figura 2.19.



**Figura 2.19** Diagrama de fuerzas durante la operación de corte. Adaptada de [6].



Una de las componentes de la resultante de dichas fuerzas se encuentra situada en la dirección del eje X, paralela al eje de giro de la pieza correspondiente al avance longitudinal de la herramienta  $F_f$ ; otra fuerza se encuentra de forma tangencial a la superficie de la pieza, representado por la fuerza de corte  $F_c$ , localizada en el eje Z con referencia al torno; y, la tercera, corresponde a la fuerza radial  $F_r$ , ubicada en el eje Y. De estas tres fuerzas, la de mayor magnitud es  $F_c$ . La fuerza de corte tiene una importancia extraordinaria debido a su gran influencia sobre la potencia de corte y las vibraciones del sistema, influyendo notablemente sobre la calidad de la pieza elaborada.

Por ello, es importante identificar los estudios relacionados con el análisis y determinación de las fuerzas, los cuales son comúnmente conocidos como modelos de mecanizado, tanto para el corte ortogonal como oblicuo, entre los que destacan los investigadores Merchant, Lee-Shaffer, Kronenberg; así como también Oxley. Sus aportaciones se centran en analizar las fuerzas de corte mediante relaciones trigonométricas para determinar sus valores.

Como se corteja en la figura anterior (modelos analíticos), el diagrama de fuerzas interactúa en el plano de cizalladura  $\phi$ , así como en el de incidencia  $\alpha$  y en el tamaño de viruta, donde juega un papel primordial para dicho análisis. En base a ello, se formulan las siguientes ecuaciones, correspondientes al modelo de corte ortogonal.

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad (2.22)$$

$$F = F_c \sin \gamma + F_f \cos \gamma \quad (2.23)$$

$$N = F_c \cos \gamma - F_f \sin \gamma \quad (2.24)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_f \sin \phi \quad (2.25)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_f \cos \phi \quad (2.26)$$

Se aprecia, en la ecuación 2.22, como la fuerza resultante  $R$  puede ser descompuesta en dos fuerzas que representan las que la herramienta requiere ejercer sobre la pieza de trabajo ( $F_c$  en dirección de  $V_c$ ; y  $F_f$  de forma perpendicular a  $V_c$  como es). A su vez, dicha resultante  $R$  puede igualmente ser descompuesta en la fuerza de cizallamiento  $F_s$  y la fuerza normal  $F_n$ . Ambas tienen una relación geométrica reflejada en la ecuación 2.25 y 2.26, con respecto a la dirección de la velocidad de corte. A partir de estas expresiones puede determinarse la tensión dinámica de deslizamiento o esfuerzo cortante  $\tau_s$ , siendo un parámetro en función de las características del material cortado (ecuación 2.27).

$$\tau_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (2.27)$$

A su vez, gracias a las aportaciones de Merchant, es posible establecer el valor de la potencia requerida,  $P$ , en función de la fuerza y la velocidad de corte, mediante la ecuación que lleva su nombre:

$$P = F_c \times V_c \quad (2.28)$$

Además, observando la ecuación 2.28, la  $F_c$  tiene gran influencia en la energía potencial total generada durante el proceso de corte consumida por la unidad de tiempo.

La tabla 2.4 reúne ciertos materiales de uso actual y el valor correspondiente a la cantidad de energía específica necesaria para remover un volumen unitario durante el mecanizado. No obstante, conviene incidir en que estos valores son orientativos, debido a la complejidad de factores que intervienen en el proceso.

**Tabla 2.4** Energía específica durante el mecanizado de diferentes materiales.

Material	Energía específica $\left[ W \frac{s}{mm^3} \right]$
Aleaciones de aluminio	0.4-1
Aleaciones de magnesio	0.3-0.6
Aleaciones de níquel	4.8-6.7
Aleaciones de titanio	3- 4.1
Aceros inoxidables	2-5

Existe otro método (modelo mecanístico) que permite determinar la fuerza de corte mediante la relación con la sección de viruta indeformada  $S_o$  por un factor denominado presión específica de corte,  $K_s$ , que representa la resistencia que presenta el material durante su mecanizado, dando lugar a la ecuación 2.29.

$$F_c = S_o \times k_s \quad (2.29)$$

Sin embargo, este método es difícil de evaluar analíticamente, debido a que existen factores externos que influyen en su valor; uno de los cuales es el espesor de viruta. Varios autores trasladan este criterio de forma experimental mediante la medición tanto de sus fuerzas como de aspectos geométricos de la viruta, brindando así un modelo predictivo. Esta última observación ha sido considerada para la evaluación de los datos obtenidos experimentalmente en esta tesis.

## 2.12 Técnicas de monitorización aplicables al mecanizado

La técnica de monitorización en el proceso de mecanizado es esencial para comprender y mejorar la productividad del corte. Gran parte de las investigaciones, tanto en el ámbito académico como industrial, se han dedicado a la tarea de adaptar

técnicas flexibles mediante la incorporación de sistemas inteligentes que permitan obtener un registro continuo de todo lo que conlleva el proceso en tiempo real, sin necesidad de interrumpir el mecanizado; su misión es anticiparse, mediante acciones correctivas, y los minimizar costes y tiempos innecesarios durante el corte. Estas técnicas son consideradas herramientas claves para la toma de decisiones.

Dichas técnicas se encuentran clasificadas según el objeto de estudio, según se desee monitorizar el proceso, la herramienta, el material ó pieza de trabajo; se requiera visualizarlo de forma directa e indirecta (dependiendo de la escala de trabajo); o se pretenda controlarlo tanto fuera como dentro del proceso de corte [75, 76].

La técnica de monitoreo en línea, comúnmente mencionadas como *ON LINE*, permite evaluar e identificar en tiempo real el comportamiento de diferentes variables o eventos críticos en el proceso, dando como resultados un alto grado de precisión. Por ello, existe un sinnúmero de estudios, a nivel tanto nacional como internacional, que hablan sobre el uso y ventajas de dichas técnicas, por su utilidad científica e industrial relacionada a los factores que intervienen en el mecanizado.

Por su parte, se conoce como monitorización *OFF LINE* aquella técnica que permite caracterizar todo evento relacionado al mecanizado mediante la evaluación selectiva de la variable de estudio fuera del proceso de corte; esto implica mayor control de la variable. En esta técnica es posible aplicar diversos métodos de análisis, de los cuales se hablará de forma general.

Se ha realizado una revisión de los métodos más utilizados tanto en el ámbito académico como en el industrial, identificando la tendencia más utilizada en estudios relacionados con este tema y la combinación de métodos de monitorización ó fusión de diversas tecnologías aplicables para llevarlas a cabo, las cuales se mencionan a continuación.

### 2.12.1 Monitorización del proceso

En la actualidad, la subsistencia empresarial depende de gran parte de la innovación, la adaptación al cambio y, sobre todo, la productividad en los procesos de fabricación. Bajo estas condicionantes surge la necesidad de incrementar los controles que garantizan la calidad y eficacia del mecanizado. Por ello, aumenta el uso de técnicas accesibles que permitan cumplir los objetivos, tales como:

- *Monitorización mediante filmación de imágenes.* Técnica más empleada debido a que permite observar con exactitud y precisión el mecanizado a través de la captura de imágenes o fotogramas, en un intervalo de tiempo, de forma directa mediante el uso de una cámara digital acoplada a un sistema con software integral, permitiendo evaluar e identificar posibles anomalías surgidas durante el proceso de corte, en relación a los parámetros tecnológicos aplicados. Esta técnica es aplicada de forma *ON LINE* y su evaluación normalmente es complementada con otras técnicas de forma *OFF LINE*.

- *Monitorización acústica.* Utilizada para evaluar las condiciones del proceso mediante la monitorización de la señal acústica emitidas por el corte (sonido). Esta técnica permite detectar fallos en la herramienta e incluso para estimar la calidad superficial de la pieza de trabajo.
- *Monitorización del motor.* Técnica empleada para el control del desgaste de la herramienta y anomalías tanto del funcionamiento de la maquinaria como del proceso. Esta técnica pretende monitorizar la potencia eléctrica emitida por el motor del husillo principal de la máquina mediante un sensor de potencia logrando controlar su consumo.
- *Monitorización de vibraciones.* Su principal objetivo es detectar las vibraciones emitidas por el desequilibrio, ya sea de la pieza o de la herramienta de corte, cuyo resultado repercute de forma notable en la superficie mecanizada, mediante sensores eléctricos.

Para esta investigación se ha considerado aplicar la monitorización del proceso de corte mediante la captura de imágenes, que posteriormente serán de gran ayuda para la interpretación de los resultados. Esta técnica está catalogada como medida de control del corte de forma *ON LINE*, y posteriormente se complementa por el análisis dimensional de los aspectos macrogeométricos de la viruta y de la herramienta de corte (en este caso fuera del proceso de corte).

### 2.12.2 Monitorización de la herramienta de corte

La búsqueda de nuevos materiales más resistentes ha sido un reto de gran interés científico en el ámbito relacionado a la fabricación de herramientas de corte. El material influye de forma directa tanto en los tiempos como en los costes de todo proceso de conformado por arranque de viruta. Por ello, gran parte de los estudios relacionados con la caracterización del mecanizado se han dedicado a implementar y actualizar diversas técnicas de control encaminados al funcionamiento óptimo de la herramienta de trabajo, mediante la previsión anticipada ante una posible fisura parcial o rotura completa [76, 77]. Se destacan diversas técnicas tales como:

- *Monitorización de las fuerzas de corte.* Esta técnica se obtiene mediante la captura de señales eléctricas bajo el uso de sensores transductores como los acelerómetros, piezoeléctricos, galgas extensiométricas. El objetivo de esta técnica es lograr medir la fuerza cortante en las tres direcciones que se presenta el corte.
- *Monitorización mediante un sistema multisensor.* Este método permite correlacionar diversas variables que influyen de forma directa en la herramienta de corte. Esta técnica se conoce con el nombre de “redes neuronales” o “fusión de sensores” ya que permite adquirir la medida de aceleración, vibraciones producidas, así como la intensidad de corriente que circula al momento de general el corte a través del uso de múltiples sensores.
- *Monitorización óptica.* Esta técnica es muy distinta a la captura de imagen; su mayor diferencia se encuentra en el uso de equipamientos especiales, a través de sensores de rayo láser, fibras ópticas o iluminación adaptativa. Permite un

control dimensional de las magnitudes físicas del objeto, ya sea de la herramienta como de la pieza de trabajo. Esta técnica puede ser empleada tanto fuera como dentro del proceso; para ello es necesario un sistema óptico compuesto por un láser y un dispositivo fotoelectrónico.

- *Monitorización térmica.* Es aplicada para identificar los aspectos térmicos relacionados en la zona cortante mediante el uso de cámaras con visión infrarroja ó termopares. Y se encuentra asociada con cambios fisicoquímicos tanto en la herramienta como en la pieza de trabajo.
- *Monitorización mediante emisiones acústicas.* Esta técnica pretende medir los niveles acústicos generados por el proceso de corte y, posteriormente, asociarlos con la forma de la viruta o desgaste de herramienta.

Hay que puntualizar que una parte clave en esta tesis ha sido el uso de la técnica de monitoreo de señales de fuerzas cortantes. Su captura se encuentra determinada por la señal eléctrica emitida de forma analógica, ya sea en unidad de frecuencia como mediante intervalo del tiempo que perdura el proceso de corte. Para este estudio se ha tenido en consideración el uso de un transductor piezoeléctrico conocido en el ámbito industrial como sensor dinamométrico, en el que posteriormente dichas señales serán procesadas para obtener una amplitud de onda que determine el estado del proceso. Esta técnica forma parte de las herramientas de supervisión automatizada más utilizadas para el diagnóstico del mecanizado, y está catalogada como medida de control del corte de forma *ON LINE*.

Una vez adquiridos los datos experimentales se requiere complementarlos con modelos matemáticos para que, en conjunto, logren predecir los parámetros tecnológicos adecuados al corte, siendo todo ello necesario realizarlo fuera del proceso. Para ello, es preciso recurrir a una serie de estudios que emplean esta técnica a fin de recrear el mejor medio para su comprensión e implementación.

Tal es el caso de M. Hamdan [78] que desarrolla modelos dinámicos de las fuerzas en relación al ángulo de corte y el *chatter* (vibración) generado durante el proceso, logrando analizar la estabilidad del corte mediante la variación de la potencia específica; y concluyendo que la fuerza de fricción generada en la zona de corte (al contacto de herramienta-pieza) es uno de los factores determinante para la generación del *chatter*. Sin embargo estos estudios no hacen referencia acerca de su relación directa con el desgaste de la herramienta. Para tal efecto, se han considerado las aportaciones realizadas por investigadores de la Universidad de Maribor [79], que logran conjuntar distintas técnicas de monitorización, relativas al mecanizado a través del análisis de las fuerzas cortantes, con el estado físico de la herramienta y la superficie mecanizada.

Otro ejemplo que fusiona algunas técnicas de monitorización es la propuesta realizada por investigadores de la Universidad de Castilla-La Mancha, que emplea técnicas que permiten adquirir mediciones instantáneas tanto fuera como en el proceso de corte. Para llevarlo a cabo hicieron uso de tecnología adecuada al parámetro de estudio deseado (en este caso un sensor dinamométrico para la captura de fuerzas de corte) así como también el uso de un acelerómetro para la captura de vibraciones

mecánicas; y, finalmente, una evaluación dimensional sobre el acabado superficial de la pieza de trabajo. La evaluación de los resultados obtenidos permitió determinar modelos predictivos en relación a los parámetros de corte y las variables de estudio (fuerzas de corte, Ra, aceleración).

### 2.12.3 Monitorización de la pieza de trabajo

En este apartado se consideran dos vertientes de estudio. Una de ellas está dirigida a la descripción general sobre las técnicas de monitorización relacionadas con la pieza de trabajo; y la otra direccionada al control de la viruta.

- *Monitorización macrogeométrica de la pieza de trabajo.* Esta técnica pretende evaluar de forma dimensional la pieza de trabajo a través de su redondez, paralelismo o rectitud (en este caso cilíndrica) en función de los parámetros tecnológicos ejercidos en el corte.
- *Monitorización microgeométrica de la pieza de trabajo.* Este método engloba desde la evaluación al acabado superficial de la pieza mecanizada, aplicando la normativa ISO 4287:1997 [80, 81], empleando un rugosímetro como instrumento de medida. Por otro lado, en ella también se encuentra localizada el análisis de tensiones residuales, así como también ensayos metalográficos en cierta zona de la superficie mecanizada, con la intención de identificar alguna anomalía relacionada al proceso de corte.

Así mismo, tal como se indicó, existe otra vertiente dentro de esta sección destinada al monitoreo de la viruta generada en el mecanizado.

- *Monitorización del mecanismo de formación de viruta.* Realizado mediante la captura de imágenes, termografías o señales acústicas en un lapso determinado correspondiente a la señal o fotograma de la variable de medida, donde se tiene en consideración la evaluación tanto de su forma como clasificación mediante la normativa ISO 3685:1993, anexo G [37]. A esta técnica también se la conoce como monitorización de aspectos macrogeométricos. Su uso se lleva acabo tanto dentro como fuera del proceso.
- *Monitorización de aspectos microgeométricos.* Mediante el uso de técnicas metalográficas, acompañadas con técnicas de procesamiento digital de imágenes (ambas relacionadas con aspectos geométricos de la viruta en virtud de los parámetros de corte utilizados en el proceso). Esta técnica es aplicable fuera del proceso de corte.

Es importe destacar que este estudio demanda el uso de técnicas especiales como la microscopía óptica, catalogadas como técnicas de observación debido a que incorpora mediciones a través de la captura de imágenes, permitiendo analizar de forma más concreta el comportamiento de la viruta. Dicha técnica es utilizada de forma mayoritaria por diversos grupos científicos [34, 50, 82] que destacan por sus investigaciones sobre la caracterización microscópica de material mecanizado, pues permite visualizar la microestructura tanto de la superficie del material y de la viruta.



### 2.13 Modelos paramétricos relacionados con el mecanizado

Durante las últimas décadas se han desarrollado modelos matemáticos que logran caracterizar las operaciones de corte. Algunos han sido posibles aplicarlos en la industria; otros todavía se encuentran en fase de desarrollo, o bien con uso científicos.

Los modelos predictivos surgen a través de la base de datos extraídos experimentalmente o también mediante el uso de técnicas de simulación (actualmente como medio óptimo y práctico). Su diseño tiene como prioridad entender y predecir el comportamiento del mecanizado, garantizando las condiciones aceptables de trabajo en relación con los parámetros de estudio (el comportamiento de las fuerzas de corte, el tipo de viruta, la temperatura de corte, vida útil de la herramienta de corte, dimensiones, así como la integridad superficial de la pieza de trabajo, por mencionar algunos), los cuales están representadas por el coeficiente obtenido de forma empírica a través de ensayos de caracterización (combinación de parámetros entre pieza, herramienta y geometría de corte).

No obstante, en la actualidad aún no ha sido posible determinar un modelo que integre las variables mencionadas en una sola expresión matemática, lo que está motivado por una sencilla razón. Para analizar el proceso de corte es imprescindible conjuntar diversos criterios metalúrgicos, mecánicos, químicos y dinámicos, entre otros. Cada uno conlleva variables independientes entre sí, creando una complejidad al momento de evaluarlas. Por ello, las operaciones de mecanizado siguen siendo altamente cuestionadas, sensibilizando a los grupos de investigadores hacia el control de la viruta, como es el caso del CIRP [83], proponiendo cambios paradigmáticos acordes con los nuevos avances tecnológicos, ya sea en materiales de trabajo, herramientas de corte, diseños complejos o en nuevos métodos de mecanizado.

Se pretende identificar modelos predictivos basados en métodos de ingeniería, aplicables para la caracterización del mecanizado, con la misión de aportar una combinación idónea que permita un rendimiento del mecanizado de materiales de uso aeronáutico. Para ello, es necesario identificar los métodos más empleados en este ámbito:

- *Método estadístico mediante diseño de experimentos (DoE)*. Permite aplicar de forma sistemática la influencia de ciertos factores en una variable de interés, consistiendo en el estudio de la variación de las condiciones habituales de un proceso, aumentando las probabilidades de identificar cambios significativos en el resultado. Dentro de esta gama se encuentran otros métodos conocidos el como método Taguchi, el diseño factorial o la metodología de superficie de respuesta.
- *Método con análisis de factor por factor (Fbf)*. Es una técnica que permite condensar de manera individual cada variable de estudio, permitiendo reducir la complejidad de su análisis a partir de ciertas condiciones previamente establecidas, en las que la variación de la respuesta podrá atribuirse a un único factor.

### 2.13.1 Modelos relacionados con aspectos geométricos de la viruta

Otro ámbito de estudio de los parámetros relacionados con la viruta es la estimación o comprobación del ángulo de cizalladura  $\phi$ . Algunos investigadores citan que dicho factor está relacionado de forma directa con la predicción de las fuerzas de corte; de ahí la importancia en determinar su valor. Algunos modelos postulaban que  $\phi$  era igual al ángulo de incidencia de la herramienta, descartando los efectos del ángulo de desprendimiento,  $V_c$  e incluso las propiedades del material de trabajo. No obstante, esta hipótesis cambió gracias a las observaciones hechas por Stabler, pues hizo posible agregar una constante de proporcionalidad dependiendo del material de trabajo y las condiciones de corte. Este nuevo parámetro es conocido como ángulo de desprendimiento equivalente.

También existen otros modelos, igualmente reconocidos pero no tan funcionales, como es el caso del propuesto desde la Universidad de Melbourne por el investigador E. Armarego [49], quien centró su análisis en la relación de las fuerzas de cizalladura con respecto a su velocidad de corte, como se indicó en el apartado correspondiente al ángulo de cizalladura.

Investigaciones como J. Artozoul [84] emplean las aportaciones de Merchant de forma analítica para evaluar los resultados experimentales relacionados con distintos parámetros, que son utilizados para caracterizar el mecanismo de formación de la viruta. Entre ellos, la estimación de la longitud de contacto  $l_v$ , empleado en el cálculo de la conductividad térmica en relación con la herramienta y viruta. Este parámetro repercute en las propiedades fisicoquímicas del material empleado en la herramienta de corte [85]. Comparte algunos de los modelos más utilizados para parámetro que permite validar los resultados obtenidos de forma empírica con respecto al analítico.

$$\text{Lee y Shaffer} \quad l_v = \frac{(h_o \sqrt{2})}{\sin \phi \sin \left( \frac{\pi}{4} + \phi - \gamma \right)} \quad (2.30)$$

$$\text{Toropov y Ko [86]} \quad l_v = 2 \times h_v \quad (2.31)$$

$$\text{Sutter [87]} \quad l_v = 1.92h_v - 0.09h_o \quad (2.32)$$

$$\text{Zhang [88]} \quad l_v = 8.677 \times 10^{-5} f^{-0.5} V_c^{-0.065} (90^\circ - \gamma)^{0.73} \quad (2.33)$$

Otro caso particular relacionado con la viruta es la estimación de la relación de corte mediante modelos empíricos. Aquí se centran los estudios realizados por A. Daymi [89]. Su objetivo fue analizar los efectos de la  $V_c$  en relación a la morfología de la viruta y las fuerzas de corte durante el mecanizado de barras de la aleación Ti6Al4V mediante el análisis ortogonal. Identificaron que la deformación plástica depende de la evolución de  $V_c$  en relación con el  $f$ .

$$r_c = \frac{h_c}{f} \quad (2.34)$$



Considerando este análisis, dicho estudio propone un modelo predictivo en función de los parámetros de corte ( $V_c$  y  $f$ ).

$$r_c = 1.826f^{-0,143}V_c^{-0,136} \quad (2.35)$$

Además, el investigador G. Sutter [47] presentó diversos modelos empíricos que permiten predecir el comportamiento morfológico de la viruta durante el mecanizado con alta velocidad de aleaciones con base titanio. Su análisis consistió en observar en detalle la geometría de la viruta adquirida en cada ensayo e identificar algunos aspectos de ella (grado de segmentación, ángulo de cizallamiento y frecuencia de segmentación,  $f_e$ ), para posteriormente predecir su comportamiento e integrar la ecuación 2.36.

$$f_e = \frac{\text{Numero de segmentos}}{\text{tiempo del corte}} \quad (2.36)$$

Dicha ecuación se encuentra relacionada con la  $V_c$  empleada en cada ensayo y corresponde al número de segmentación producido en una unidad de tiempo. Sin embargo, existen otros métodos para determinar  $f_e$  [54, 90], visualizados en la ecuación 2.37, en función de la  $V_c$  y  $L$ , correspondiente a la longitud de la superficie mecanizada.

$$f_e = \frac{V_c}{L} \quad (2.37)$$

Los resultados para ambos estudios presentan una tendencia lineal en relación con  $f_e$  respecto a  $V_c$ . Concluyen que ambos parámetros se encuentran íntimamente enlazados, de forma que a medida que aumenta  $V_c$  mayor será el valor de  $f_e$ .

Para finalizar esta sección, es conveniente indicar que dentro del grupo de investigación en el que se desarrolla esta Tesis Doctoral existen temas relacionados con la caracterización del mecanizado para ciertos materiales, mediante el análisis morfológico de la viruta; empleando modelos por regresión a escala logarítmica con ajuste potencial para ciertos parámetros de estudio, considerados de forma orientativa [31, 50].

### 2.13.2 Modelos relacionados con la herramienta de corte

Como se indicó con anterioridad, existen modelos adaptados (conjunto de métodos tanto analíticos como empíricos) que relacionan el desgaste de la herramienta de corte con respecto a distintos parámetros tecnológicos, como pueden ser la variación de su aspecto geométrico o la temperatura emitida durante el corte, entre otros. Sin embargo, existe un modelo empírico de mayor uso para predecir la vida de la herramienta, normalizado en ISO 3685:1993 [37], y que conjunta las aportaciones del investigador Taylor en lo que corresponde a este tema (ecuación 2.38).

$$T^n \times V_c \times f^x \times p^y = C \quad (2.38)$$

Donde,  $C$ ,  $x$ ,  $y$  son constantes, siendo el resto parámetros de corte los establecidos previamente (velocidad, avance y profundidad de corte).

Sin embargo, existen metodologías que utilizan distintas técnicas de análisis y, por ende, un mayor número de factores por evaluar. Sin embargo, tratan de conjuntar una idea central relativa al desgaste de la herramienta de corte. Tal es el caso de los estudios realizados desde la Universidad de Cádiz [1-3, 59], a través de la medida del perfil geométrico de la superficie mecanizada, en relación a los aspectos geométricos de la herramienta de corte visualizados tridimensionalmente; cuyo resultados permiten caracterizar la evolución del desgaste de la herramienta (en este caso, por adhesión en el filo secundario) en función de la velocidad de corte y su avance.

### 2.13.3 Modelos relacionados con las fuerzas de corte

Hoy en día, el estudio de los procesos de mecanizado se encuentra asociado a numerosas investigaciones con la misión de brindar una herramienta auxiliar que permita mejorar el proceso mediante la integración de técnicas adaptadas a los nuevos retos tecnológicos, brindando soluciones cercanas al comportamiento real.

A continuación, se realiza una revisión de los trabajos asociados con la caracterización del mecanizado, al aplicar distintas técnicas (empíricas y/o analíticas) que permiten predecir la relación de la vida de la herramienta de trabajo en relación con las fuerzas de corte.

Los estudios realizados desde la Universidad de Birmingham [91] identificaron la dinámica de corte mediante un modelo matemático que permite estimar el coeficiente dinámico mediante el corte ortogonal; lograron definir que las vibraciones están relacionadas de forma directa con la formación de la viruta, a través de su espesor, el cual varía en función de la velocidad de giro y la geometría de la herramienta.

Otras publicaciones recientes identifican las fuerzas de corte como fuente de estudio de gran importancia, ya que permiten extraer datos relevantes del proceso del mecanizado, combinados con otros parámetros (tales como la aceleración, sonido o, en algunos casos, aspectos físicos de la propia pieza de trabajo); y, en conjunto, establecen modelos matemáticos para la caracterización del proceso de corte, empleando distintos algoritmos predictivos, en su mayoría con tendencia potencial, relacionados con diversos parámetros de corte. En atención a ello, a continuación se incluyen el modelo de la ecuación 2.39.

$$F_c = kb^x V_c^y f^z \quad (2.39)$$

Dicha ecuación es empleada en los estudios de A. Hamid [92], aplicados al mecanizado con corte ortogonal de aleaciones con base de aluminio.

Dicho estudio reveló que es posible determinar las fuerzas de corte a través de la anchura de corte  $b$ , la velocidad de giro  $V_c$  y el avance  $f$ , siendo posible identificar las fuerzas transitorias generadas en el corte. Los términos  $k$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son constantes.

Existe otra línea de estudio, realizada de forma experimental, mediante la relación entre las fuerzas de corte y ciertos parámetros como es  $p$ ,  $F_c$  y  $f$ , que proporciona la presión de corte requerida del material mecanizado [93].

## 2.14 Conclusiones

En el presente capítulo se ha realizado una aproximación al estado del arte, orientado a la caracterización morfológica de la viruta en el proceso de torneado en seco, teniendo en cuenta su relación con parámetros y variables de entrada y/o salida asociados a la misma y al proceso. Se han considerado ciertos estudios de ámbito internacional como parte esencial de esta línea de investigación.

Por otro lado, ha sido posible identificar los recursos necesarios para la monitorización del proceso de corte relativos al control de las fuerzas de corte, los aspectos geométricos de la viruta y el desgaste de la herramienta.

Finalmente, se ha identificado una serie de modelos matemáticos aplicables a la predicción del comportamiento del mecanizado en función de las variables de entrada consideradas ( $V_c$ ,  $f$  y  $ap$ ), a través del análisis de viruta. Estos modelos facilitan la selección de los valores de los parámetros de corte a aplicar, de forma que se consiga una mejora en el rendimiento del proceso.

## Referencias

- [1] F. J. Trujillo Vilches. Análisis paramétrico del mecanizado en seco de la aleación UNS A97075. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, (2013). ISBN:978-84-9747-776-5.
- [2] M. Batista Ponce. Características de los mecanismos de adhesión secundaria y su influencia en el desgaste de herramientas de corte. Aplicación al mecanizado en aleaciones ligeras. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, (2013).
- [3] J. M. Gerez Miras. Estudio del torneado en seco de la aleación Ti6Al4V. Relaciones paramétricas para el acabado superficial. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, (2014).
- [4] M. M. Escudero. Introducción a los procesos de fabricación: Universidad Nacional de Educación a Distancia, (2000). ISBN:9788436241396.
- [5] M. Merchant, S. Moehring. An interpretive review of 20th century us machining and grinding research. TechSolve, Inc. , (2003). 8-25.
- [6] E. P. Degarmo, J.T. Black, R.A Kohser. Materials and Processes in Manufacturing 10th Edition for Maine-Orono: John Wiley & Sons, Incorporated, (2010). ISBN:9780470767313.
- [7] G. Smith. Cutting tool technology: industrial handbook: Springer, (2008). ISBN:184800205X.
- [8] S. Garg, D. Dornfeld, K. Berger. Formulation of the chip cleanability mechanics in Burrs : Analysis, Control and Removal. ed Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, (2010). 229-236.
- [9] P. Arrazola. Assessment of deburring costs in Industrial (case studies). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ((2010). 245-255.
- [10] I. Finnie. Review of metal cutting analysis for the past hundred years. ASME Mechanical Engineering, 78, (1956).715-721.
- [11] M. Cocquilhat. Experiences sur la resistance utile produites dans le forage. Annales des Travaux Publics en Belgique 10, (1851).199.
- [12] A. Mallock. The Action of Cutting Tools. Proc. Royal Soc. London 33, (1881).127-139.
- [13] F. W. Taylor. The art of cutting metals. Scientific American, 63, (1907). 25942-25944.
- [14] M. E. Merchant. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. Journal of applied physics, 16, (1945). 267-275.
- [15] V. P. Astakhov , S.V. Shvets, O. Osman. Chip structure classification based on mechanics of its formation. Materials Processing Technology, (1997). 247-257.
- [16] V. Piispanen. Theory of Formation of Metal Chips. Journal of Applied Physics, 16/5, (1948). 877-881.
- [17] G. Stabler. The fundamental geometry of cutting tools. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 165, (1951). 14-21.
- [18] C. Shaw, H. Cook, A. Smith. The mechanics of three-dimensional cutting operations. Transactions of the ASME 74, (1952). 1055-1064.
- [19] B. Von Turkovich. Shear stress in metal cutting. Journal of Engineering for Industry, 92, (1970). 151-157.
- [20] B. Von Turkovich. Cutting theory and chip morphology in Handbook of High-Speed Machining Technology. ed: Springer, (1985). 27-47.
- [21] L. De Chiffre. Mechanics of metal cutting and cutting fluid action. International Journal of Machine Tool Design and Research, 17, (1977). 225-234.

- [22] M. Ávila, J. Gardner, C. Reich-Weiser, S. Tripathi, D. Dornfeld. Strategies for Burr Minimization and Cleanability in Aerospace and Automotive Manufacturing. Laboratory for Manufacturing and Sustainability. University of California, Berkeley, (2006).11.
- [23] W. Grzesik. Mechanics of cutting and chip formation in Machining of Hard Materials. ed: Springer, (2011). 87-114.
- [24] S. Melkote, T.R. Newton, C. Hellstern, J.B. Morehouse, S. Turner. Interfacial burr formation in drilling of stacked aerospace materials in Burrs-Analysis, Control and Removal. ed: Springer, (2010). 89-98.
- [25] Z. Liao, D. A. Axinte. On chip formation mechanism in orthogonal cutting of bone. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 102, (2016). 41-55.
- [26] R. Komanduri. Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys. Wear, 76, (1982). 15-34.
- [27] S. Jaffery, N. Driver, et al. Analysis of process parameters in the micromachining of Ti-6Al-4V alloy. in Proceedings of the 36th International MATADOR Conference,(2010). 239-242.
- [28] R. Li and A. J. Shih. Finite element modeling of 3D turning of titanium. in ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,(2004). 825-833.
- [29] T. Ozel, Sima, M. Finite element simulation of hight speed machining Ti6Al4V alloy using modified material models. Manufacturing Automation Research Laboratory, 38, (2010). 49-56.
- [30] M. Calamaz. Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caractérisation de l'interface outil-copeau—Application a l'usinage de l'alliage de titane aéronautique TA6V. Université de Bordeaux. (2008).
- [31] M. Batista, M. Calamaz, F. Girot, J. Salguero, M. Marcos. Using Image Analysis Techniques for Single Evaluation of the Chip Shrinkage Factor in Orthogonal Cutting Process. Key Engineering Materials, 504, (2012). 1329-1334.
- [32] D. Drucker. An analysis of the mechanics of metal cutting. Journal of Applied Physics, 20, (1949). 1013-1021.
- [33] D. Drucker, Ekstein, H. A dimensional analysis of metal cutting. Journal of Applied Physics, 21, (1950). 104-107.
- [34] Y. Sánchez, F. J. Trujillo, L. Sevilla, M. Marcos. Study of the Influence of the Cutting Parameters on the Chip Geometry During Machining Alloy UNS A97075. Procedia Engineering, 132, (2015). 513-520.
- [35] M. Sánchez , M. Marcos. Relaciones paramétricas en el mecanizado. Cadiz , España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, (1994). ISBN:84-7786-184-6.
- [36] R. Komanduri and B. F. Von Turkovich. New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys. Wear, 69, (1981). 179-188.
- [37] ISO 3685:1993 Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools. Genève, Switzerland, (1993).
- [38] E. Sánchez, A. Rubio, J. Camacho, M. Marcos,. Chip arrangement in the dry cutting of aluminium alloys. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 16, (2006). 1-2.
- [39] I. S. Jawahir. The chip control factor in machinability assessments: Recent trends. Journal of Mechanical Working Technology, 17, (1988). 213-224.
- [40] Y. Zhang, J. Peklenik. Chip Curl, Chip Breaking and Chip Control of the Difficult-to-Cut Materials. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 29, (1980). 79-83.
- [41] K. Nakayama, M. Arai. Comprehensive Chip Form Classification Based on the Cutting Mechanism. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 41, (1992). 71-74.

- [42] A. Kharkevich, K. Venuvinod. Basic geometric analysis of 3-D chip forms in metal cutting.: Part 1: determining up-curl and side-curl radii. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, (1999). 751-769.
- [43] V. C. Venkatesh. Performance Studies of Uncoated, CVD-Coated and PVD-Coated Carbides in Turning and Milling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40, (1991). 545-550.
- [44] I. S. Jawahir, C. Van Luttervelt. Recent Developments in Chip Control Research and Applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42, (1993). 659-693.
- [45] H. Tschatsch. *Turning in Applied machining technology*. ed Alemania: Springer, (2009). 51-95.
- [46] S. A. Batzer. An analytical and experimental investigation into chip morphology in orthogonal machining. 9829766 Ph.D. Michigan Technological University, Ann Arbor, (1998). ISBN:9780591824872; 0591824876.
- [47] G. Sutter, G. List. Very high speed cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy—change in morphology and mechanism of chip formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 66, (2013). 37-43.
- [48] A. Gente, Hoffmeister, H. W., Evans, C. J. Chip Formation in Machining Ti6Al4V at Extremely High Cutting Speeds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50, (2001). 49-52.
- [49] E. J. A. Armarego. A note on the shear angle relation in orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 6, (1966). 139-141.
- [50] M. Batista, J. Salguero, A. Gomez, S. Fernández, M. Marcos. SOM based Methodology for Evaluating Shrinkage Parameter of the Chip Developed in Titanium Dry Turning Process. *Procedia CIRP*, 8, (2013). 534-539.
- [51] H. Schulz, E. Abele. Material aspects of chip formation in HSC machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50, (2001). 45-48.
- [52] M. Sánchez, M. Marcos, M. Álvarez, M. Sánchez, J. P. Contreras. Relaciones paramétricas asociadas a la maquinabilidad de aleaciones de aluminio-cobre. in *Anales de Ingeniería Mecánica*, (1997). 59-66.
- [53] S. Coromant. *El mecanizado moderno*. 81, (1994).
- [54] S. Sun, M. Brandt, M. S. Dargusch. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, (2009). 561-568.
- [55] ISO 1832:2012 Indexable Inserts for Cutting Tools—Designation. Genève, Switzerland, (2012).
- [56] G. Byrne, D. Dornfeld. Advancing Cutting Technology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52, (2003). 483-507.
- [57] A. Shokrani, V. Dhokia. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57, (2012). 83-101.
- [58] H. A. Kishawy, M. A. Elbestawi. Effects of process parameters on material side flow during hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, (1999). 1017-1030.
- [59] D. García, J. M. Vazquez. FVM Based Study of the Influence of Secondary Adhesion Tool Wear on Surface Roughness of Dry Turned Al-Cu Aerospace Alloy. *Procedia Engineering*, 132, (2015). 600-607.
- [60] M. Batista, P. Davim, J. Salguero, A. Gomez, M. Marcos. Taylor's Model Based Analysis of Turning Inserts Tool-Life in the Dry Turning of UNS R56400 Alloy. in *ASME*



- 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,(2014). V001T01A060-V001T01A060.
- [61] J. Salguero, M. Batista. Cutting Forces Parametric Model for the Dry High Speed Contour Milling of Aerospace Aluminium Alloys. *Procedia Engineering*, 63, (2013). 735-742.
  - [62] ISO 3364:2011 Indexable hardmetal (carbide) inserts with rounded corners, with cylindrical fixing hole — Dimensions. Genève, Switzerland, (2011).
  - [63] M. F. Ashby. *Materials and the environment: eco-informed material choice*: Elsevier, (2012). ISBN:0123859727.
  - [64] ISO 13399:2006 Cutting tool data representation and exchange. Part 1: Overview, fundamental principles and general information model. Genève, Switzerland, (2006).
  - [65] AENOR 16148:1985 Ensayos de duración de herramientas de torno de corte único. Madrid, España, (1985).
  - [66] R. Venkata. *Environmental Aspects of Manufacturing Processes in Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes*. Springer, (2011). 339-360.
  - [67] W. Shefelbine, D. A. Dornfeld. The effect of dry machining on burr size. *Laboratory for Manufacturing and Sustainability*, (2004).
  - [68] A. Attanasio, M. Gelfi. Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear. *Wear*, 260, (2006). 333-338.
  - [69] S. Sun, M. Brandt. Effect of cryogenic compressed air on the evolution of cutting force and tool wear during machining of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 221, (2015). 243-254.
  - [70] L. N. López De Lacalle, C. Angulo. Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, (2006). 11-15.
  - [71] F. Trujillo, L. Sevilla. Cutting Speed-Feed Coupled Experimental Model for Geometric Deviations in the Dry Turning of UNS A97075 Al-Zn Alloys. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, (2014). 382435.
  - [72] D. Heilmann. *BurrMinimization Strategies in Machining Operations*. Springer Berlin Heidelberg, (2010). 8.
  - [73] V. Norouzifard, M. Hamed. Experimental determination of the tool–chip thermal contact conductance in machining process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 84, (2014). 45-57.
  - [74] J. Artozoul, C. Lescalier. Experimental and analytical combined thermal approach for local tribological understanding in metal cutting. *Applied Thermal Engineering*, 89, (2015). 394-404.
  - [75] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'donnell, D. Dornfeld. Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59, (2010). 717-739.
  - [76] S. Dimla. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40, (2000). 1073-1098.
  - [77] S. Kurada, C. Bradley. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. *Computers in Industry*, 34, (1997). 55-72.
  - [78] M. N. Hamdan, A. E. Bayoumi. An approach to study the effects of tool geometry on the primary chatter vibration in orthogonal cutting. *Journal of Sound and Vibration*, 128, (1989). 451-469.

- [79] M. Milfelner, F. Cus. An overview of data acquisition system for cutting force measuring and optimization in milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, (2005). 1281-1288.
- [80] ISO 4288:1998. Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil in UNE-EN ISO 4288. Madrid, España, (1998). 1-19.
- [81] ISO 1302:2002. Especificación geométrica de productos (GPS). Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos in UNE-EN ISO 1302. Madrid, España, (2002). 1-55.
- [82] L. D. J. Scheider, J. Howe, H. Meyer. Microstructural Characterization of Ti-6Al-4V Metal Chips by Focused Ion Beam and Transmission Electron Microscopy. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 42A, (2011). 1-7.
- [83] C. A. Van Luttervelt, T. Childs. Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations Progress Report of the CIRP Working Group 'Modelling of Machining Operations'. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47, (1998). 587-626.
- [84] J. Artozoul, C. Lescailier. Extended infrared thermography applied to orthogonal cutting: Mechanical and thermal aspects. *Applied Thermal Engineering*, 64, (2014). 441-452.
- [85] M. Y. Friedman, E. Lenz. Investigation of the tool-chip contact length in metal cutting. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 10, (1970). 401-416.
- [86] A. Toropov, S.L. Ko. Prediction of tool-chip contact length using a new slip-line solution for orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, (2003). 1209-1215.
- [87] G. Sutter. Chip geometries during high-speed machining for orthogonal cutting conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, (2005). 719-726.
- [88] H. T. Zhang, P. D. Liu. A three-zone model and solution of shear angle in orthogonal machining. *Wear*, 143, (1991). 29-43.
- [89] A. Daymi, M. Boujelbene, S. B. Salem, B. H. Sassi, S. Torbaty. Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces. *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 1, (2009). 77-83.
- [90] A. Molinari, C. Musquar. Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti-6Al-4V: experiments and modeling. *International Journal of Plasticity*, 18, (2002). 443-459.
- [91] M. M. Nigm, M. Sadek, S. A. Tobias. Determination of dynamic cutting coefficients from steady state cutting data. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 17, (1977). 19-37.
- [92] A. Abdel Hamid, Y. Ali. Experimental determination of dynamic forces during transient orthogonal cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 55, (1995). 162-170.
- [93] D. G. Thakur, B. Ramamoorthy. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning. *Materials & Design*, 30, (2009). 1718-1725.







# CAPÍTULO 3

---

## ESTADO DEL ARTE: MECANIZADO DE ALEACIONES LIGERAS



**Índice**

<b>3.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>3.1</b>
<b>3.2</b>	<b>Aleaciones ligeras como material estratégico en el sector industrial.....</b>	<b>3.2</b>
<b>3.3</b>	<b>El uso del titanio en el sector industrial .....</b>	<b>3.2</b>
3.3.1	Reseña bibliográfica sobre los orígenes del titanio .....	3.2
3.3.2	Introducción del titanio al sector industrial.....	3.3
3.3.3	Aplicaciones industriales del titanio.....	3.6
3.3.4	El titanio en el sector de transporte aéreo.....	3.8
<b>3.4</b>	<b>Propiedades del Titanio .....</b>	<b>3.10</b>
<b>3.5</b>	<b>Clasificación de las aleaciones de Titanio .....</b>	<b>3.12</b>
<b>3.6</b>	<b>Aleación <i>Ti6Al4V</i> (UNS R56400) .....</b>	<b>3.14</b>
3.6.1	Características generales de la aleación <i>Ti6Al4V</i> (UNS R56400) .....	3.14
<b>3.7</b>	<b>Mecanizado de la aleación <i>Ti6Al4V</i> (UNS R56400).....</b>	<b>3.15</b>
3.7.1	Análisis morfológico de la viruta durante el mecanizado de <i>Ti6Al4V</i> .....	3.15
3.7.2	Análisis de las fuerzas de corte durante el mecanizado de <i>Ti6Al4V</i> .....	3.19
3.7.3	Desgaste de la herramienta de corte durante en el mecanizado de <i>Ti6Al4V</i> .....	3.20
<b>3.8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>3.21</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>3.22</b>



### 3.1 Introducción

Hoy en día los materiales son diseñados e investigados de forma minuciosa con el objetivo de cubrir a medida cualquier requerimiento. Por ello, resulta de especial interés conocer la evolución de los materiales a lo largo del tiempo, que viene ligada con el desarrollo histórico de la humanidad, desde la era prehistórica, con el empleo de materiales tradicionales (tales como la piedra, bronce y hierro), hasta la actualidad, con materiales aun más avanzados (por ejemplo: materiales metálicos con altas prestaciones, polímeros, cerámicas avanzadas y materiales compuestos). La Figura 3.1 muestra, de forma breve, el desarrollo de los materiales.

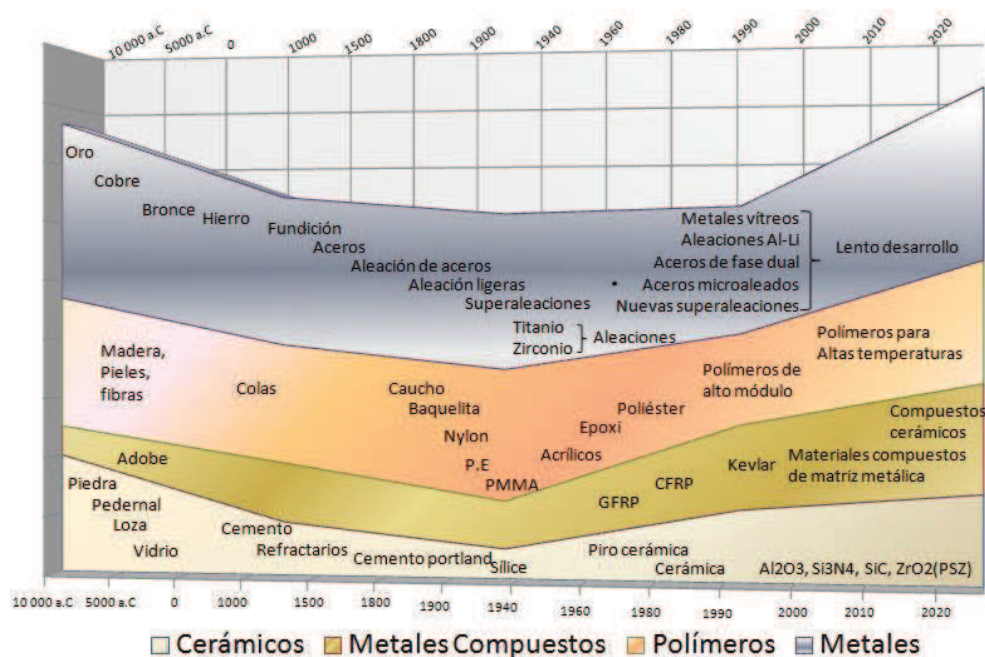


Figura 3.1 Desarrollo de materiales a nivel global. Adaptada [1].

Esta investigación centra su interés en conocer tanto el origen como la aplicación, de materiales catalogados como aleaciones ligeras, de uso en distintos sectores industriales; en particular, por su gran implicación, en la industria de transporte aéreo. De ahí la importancia de identificar materiales que cumplan con los estrictos requisitos de calidad y seguridad en este sector. Para hacer frente a estas necesidades se crean materiales certificados con una alta relación de resistencia/peso, resistencia/corrosión y buen comportamiento a fatiga.

### 3.2 Aleaciones ligeras como material estratégico en el sector industrial

Las aleaciones ligeras tienen como elemento aleante el aluminio; la denominación ligera proviene de la unión con otros elementos tales como el cobre, silicio, magnesio, cinc, níquel, hierro, cromo, cobalto y titanio. La unión de dichos elementos se caracteriza por su ligereza, maleabilidad, bajo peso específico y alta ductibilidad. Algunas de ellas tienen buena maquinabilidad y permiten mejorar las propiedades mecánicas [2].

Resulta de interés analizar el crecimiento en el sector del metal, específicamente en las aleaciones ligeras, el cual se ha incrementado notablemente en los últimos 10 años. Aunque la producción más generalizada de aleaciones ligeras emplea procesos tradicionales y aleaciones de uso común, en la actualidad se desarrollan procedimientos de producción innovadores y nuevas composiciones de aleación capaces de garantizar excelentes resultados, de una manera más rentable. Estos aspectos están directamente relacionados con la reducción de masa y consumo energético, constituyendo un aspecto central para muchas aplicaciones industriales. Los sectores en los que se emplean estas aleaciones son variados, destacando los de la construcción, aeronáutico, automoción, naval y energético. Otras aplicaciones de menor escala se encuentran en el sector biomédico (prótesis), doméstico (utensilios de cocina) y deportivo, donde son empleadas por su resistencia mecánica.

### 3.3 El uso del titanio en el sector industrial

En este apartado se analizan los orígenes, aplicaciones e influencia del titanio en el sector industrial, incluyendo para ello unas breves reseñas bibliográficas y económicas de ámbito internacional, relativas a su aplicación en diversos sectores industriales. Posteriormente, se describen los tipos de aleaciones en base titanio y sus propiedades. Finalmente, se describe, con mayor detalle, la aleación objeto de este estudio: la aleación *Ti6Al4V* (*UNS R56400*), para caracterizar su comportamiento durante el proceso de mecanizado.

#### 3.3.1 Reseña bibliográfica sobre los orígenes del titanio

A inicios de 1791, el titanio fue catalogado como mineral por el químico británico William Gregory, dándose el nombre de menaquita al dióxido de titanio, a través de un estudio realizado con residuos de arena del río Helford, en Reino Unido. Por otra parte, descubrió un nuevo elemento, llamado *menachanite* (arena magnética de pigmento oscuro) o ilmenita.

Posteriormente, en 1795 el químico alemán Martin Heinrich Klaproth, tras varias investigaciones realizada en ciertas muestras de rutilo procedente de Hungría, descubrió un óxido de un elemento similar al catalogado por W. Gregory. El elevado valor de sus propiedades fue el origen de su nombre, titanio (inspirado en la mitología griega). Sin embargo, no fue hasta el siglo XIX cuando se empezó estudiar el procedimiento de obtención de dicho material como metal puro, a través de procesos de calentamiento.

En 1910, el científico estadounidense Matthew Hunter consiguió separar sus aleantes, dejando al mineral de forma pura mediante un método que lleva su nombre, *Proceso Hunter*. Finalmente, en 1937, William Justin Kroll logró obtener el metal a partir del mineral en forma de esponja metálica, mediante el método que lleva su nombre, *Proceso Kroll*,



basado en las arenas metalíferas<sup>1</sup>; en este caso contiene tetracloruro de titanio, que luego reacciona con magnesio líquido para producir titanio metal y cloruro de magnesio.

Sin embargo, no fue hasta finales de los años 40 y principios de los 50's cuando dicho proceso fue comercializado a gran escala, en Europa, por la empresa Deeside Titanium, productora de esponja de titanio. Posteriormente, la producción de titanio fue creciendo fuera de la comunidad Europea, especialmente en Japón y en la Unión Soviética. El método Kroll, actualmente se sigue utilizando para su extracción. Por ello, existen agrupaciones científicas cuyo objetivo es lograr mejorar la obtención de dicho elemento y poder llegar a combinar otras materiales, creando así aleaciones más poderosas.

### 3.3.2 Introducción del titanio al sector industrial

El titanio es el noveno elemento metálico en orden de abundancia de los elementos presentes en la corteza terrestre. Se encuentra en forma ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) o como rutilo (dióxido de titanio,  $\text{TiO}_2$ ); en ambos casos el Ti constituye el 0,63% en peso. Está catalogado como elemento de primera serie de transición<sup>2</sup>.

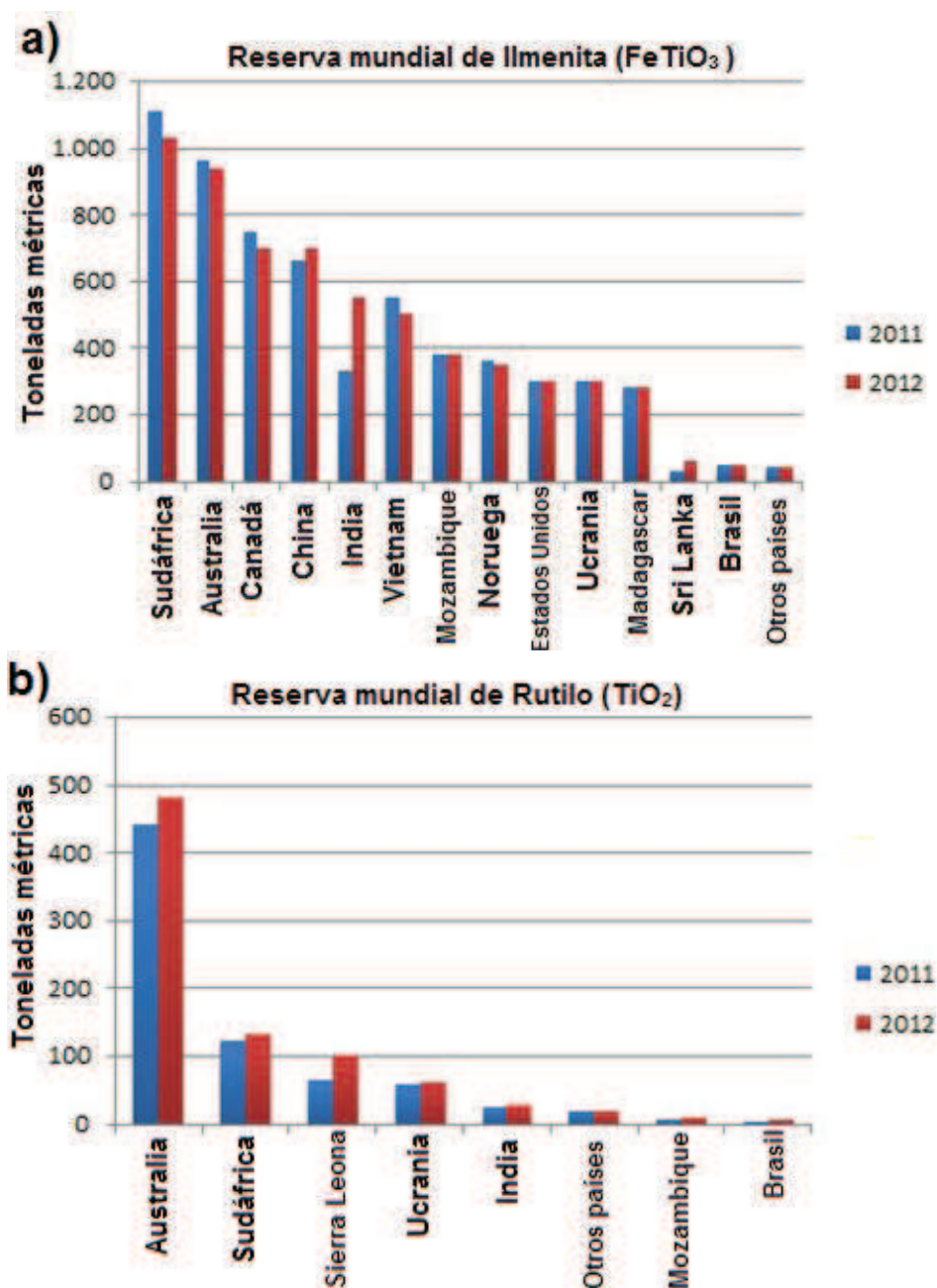
Su obtención en la actualidad sigue siendo difícil dada la reactividad que presenta frente al oxígeno, nitrógeno y carbono a temperaturas elevadas. El método más tradicional para su extracción a nivel industrial fue propuesto como se menciona con anterioridad por W. J. Kroll mediante el procedimiento que lleva su nombre. Así, el tetracloruro ( $\text{TiCl}_4$ ) obtenido por cloración de los minerales y acrisolado por destilación fraccionada, es reducido mediante magnesio en atmósfera de argón a 800° C, obteniéndose una esponja de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) que se consolida por fusión.

No obstante, sus aplicaciones más importantes derivan de su resistencia a la corrosión, sus buenas propiedades mecánicas y su baja densidad. El Ti es un buen conductor de electricidad y calor, a la vez que presenta un bajísimo nivel corrosivo frente a ataques químicos (como los ácidos) y a otros agentes. Por último, es más ligero que la mayoría de los metales.

De acuerdo a estudios microeconómicos [3-7], se conoce que el titanio fue introducido en la segunda mitad del siglo XX, de forma industrial, como material alternativo al acero. No obstante, es un metal extremadamente caro comparado con otros metales comerciales, debido a la complejidad del proceso de obtención [8]. En la Figura 3.2 se presenta la evolución, durante los últimos años, de la reserva mundial del titanio, ya sea en forma de  $\text{FeTiO}_3$  o de  $\text{TiO}_2$ .

<sup>1</sup> Comprende todas las arenas de mar, lago, río o cantera que existen en la naturaleza en forma de partículas más o menos finas, procedentes de la disgregación natural de los minerales.

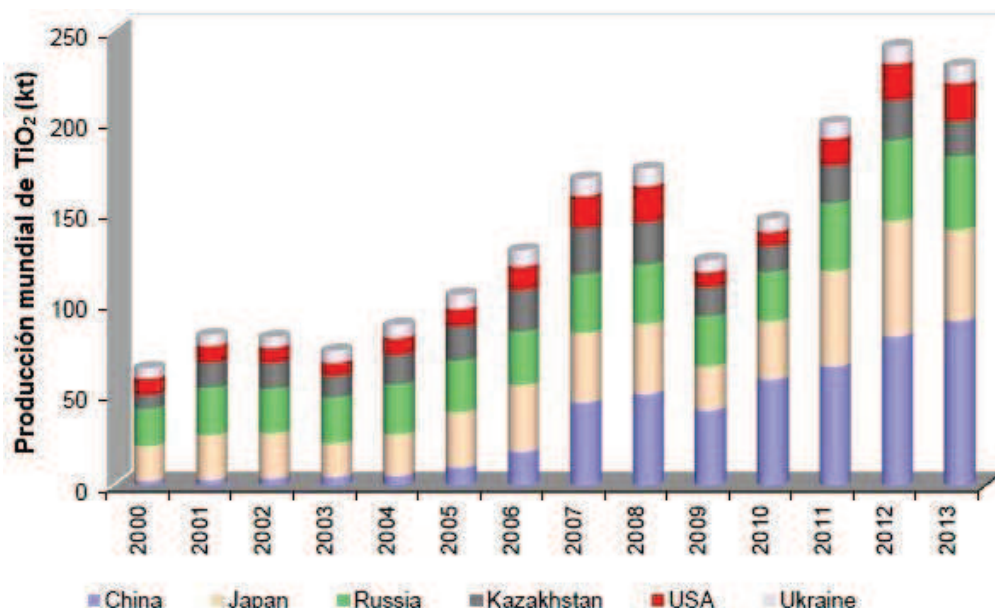
<sup>2</sup> Metales de transición (estables por si mismos sin necesidad de una reacción con otro elemento), se encuentran situados en la tabla periódica del grupo 3 al 12. Su principal característica es la inclusión electrónica del orbital *d*.



**Figura 3.2** Reserva mundial: a) de  $\text{FeTiO}_3$ , b)  $\text{TiO}_2$  en los últimos años. Adaptada [5].

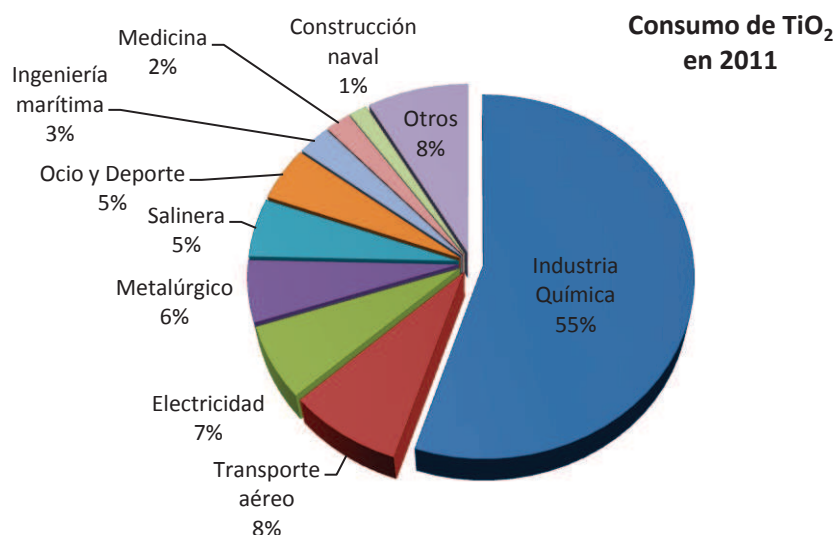
No obstante, es importante indicar que la producción de titanio como metal es limitada debido a que solo el 5% de su reserva se dedica a la obtención de diversas aleaciones (que incluyen aluminio, estaño, vanadio, zirconio o molibdeno), mientras que el resto se emplea como dióxido de titanio puro (pinturas, papel, tinta, etc.).

En esta Tesis se han tenido en consideración los estudios relacionados con la producción de  $\text{TiO}_2$ , estando centralizada la producción mundial en los seis países mostrados en la Figura 3.3 [6].



**Figura 3.3** Producción mundial de TiO<sub>2</sub> durante los últimos años. Adaptada [7].

Actualmente, la aplicación del titanio se extiende cada vez más en distintas industrias [9], dada la creciente necesidad de encontrar materiales biocompatibles y con propiedades adecuadas que garanticen a los productos un buen comportamiento a largo plazo. La Figura 3.4 es un ejemplo de ello, en la que se expresa, por sectores, la tendencia de consumo industrial de este material en China. Se ha elegido este país por detentar el record de producción y consumo en los últimos tiempos.

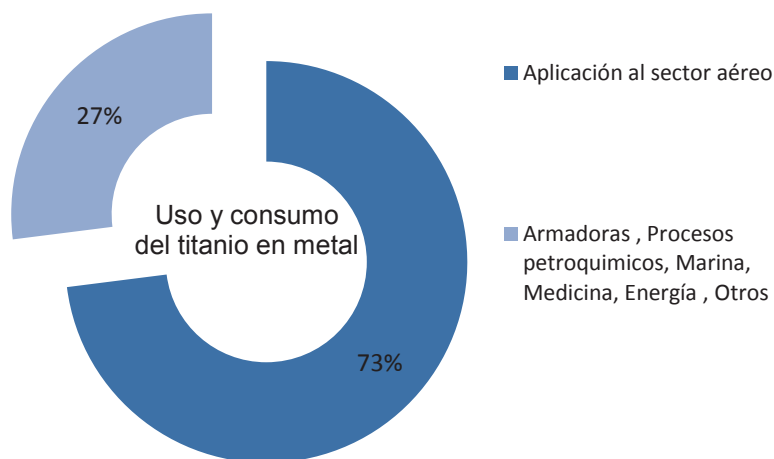


**Figura 3.4** Consumo de TiO<sub>2</sub> en China durante los últimos años. Adaptada [10].

Se observa que el 55% de este consumo se encuentra asignado al sector químico y el 8.3% al ámbito aéreo. En cambio, los Estados Unidos invierte un 60% de su producción en al sector aéreo, mientras en Japón se asigna el 90% al sector de la construcción naval.

Para concluir esta sección, es conveniente citar varios estudios, realizados en los últimos años [5, 9, 11], que sitúan un 73% del consumo mundial de titanio, como metal, en la

construcción de vehículos para el transporte aéreo, correspondiendo el 27% restante a la construcción naval, plantas químicas (especialmente para la fabricación de elementos que deben estar en contacto con cloro), aplicaciones de hardware naval, implantes médicos, generadores de energía, artículos deportivos y otras aplicaciones, tal como se aprecia en la Figura 3.5.



**Figura 3.5** Uso y consumo mundial del titanio como metal en diversos sectores. Adaptada [3].

Se puede apreciar que el sector de mayor demanda de uso se encuentra relacionado con el transporte aéreo, automovilístico y marítimo. En su mayoría estas aleaciones son utilizadas en las superficies exteriores, dada la capacidad del material para soportar la fricción generada por la fuerza del aire, así como por su peso específico. En virtud de ello, en esta investigación se analiza la tendencia de aplicación del titanio, como metal, exclusivamente en el sector aéreo. No obstante, se incluyen menciones a su aplicación en otros sectores.

### 3.3.3 Aplicaciones industriales del titanio

El titanio muestra una unas notables propiedades metalúrgicas. Sus características físicas permiten alcanzar una serie de beneficios industriales y aplicaciones comerciales, así como un elevado rendimiento de los productos fabricados con base de titanio, debido a que posee atributos únicos tales como la resistencia mecánica, frente a su densidad. Otra ventaja competitiva, a nivel económico, es el valor del rendimiento y coste del ciclo de vida.

La Tabla 3.1 muestra sus aplicaciones dentro de cada sector industrial [11].

**Tabla 3.1** Aplicaciones del Titanio.

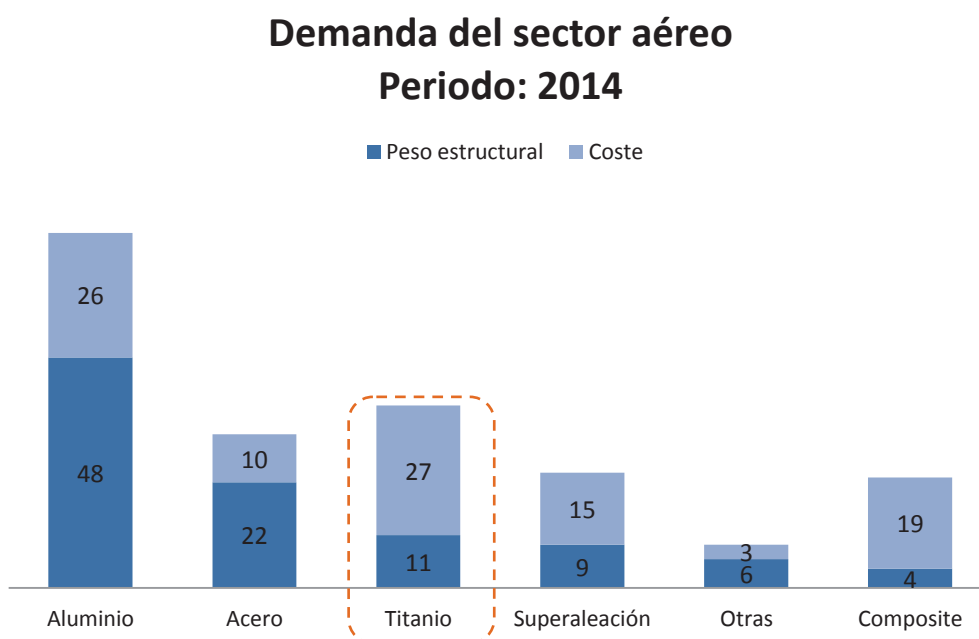
Sector	Aplicación
Químico y petroquímico	Es empleado tanto en la fabricación de recipientes como de tubos anticorrosivos para la industria química. Beneficios: alta resistencia a la corrosión al contacto con un ácido.
Centrales nucleares	Componentes internos. El Ti y sus aleaciones tienen la capacidad de impedir el paso de la radiación. El metal irradiado pierde rápidamente toda la radiactividad, permitiendo que las piezas sean fácilmente manejables, lo que simplifica el mantenimiento del reactor.
Medicina	El titanio está catalogado como material inerte. Beneficios: gran compatibilidad con la estructura ósea (su cubierta de óxido en contacto con tejidos humanos resulta insoluble; es decir, no libera iones que reaccionen con otras moléculas orgánicas, dado que los tejidos del organismo toleran su presencia). Además, el titanio es un material no magnético, por lo que es factible la fabricación de muchas prótesis e implantes. Por otro lado, es utilizado para la fabricación de ciertos instrumentos quirúrgicos.
Alimenticia	El titanio forma parte estratégica en equipos de procesamiento de alimentos, en calderas, vasos de centrifugado, barriles, dispensadores, filtros, tuberías, intercambiadores de calor. Beneficios: se encuentran relacionados con la protección contra la corrosión e higiene.
Automoción	En la fabricación de válvulas de motor, bielas, retenes, muelles y partes estructurales del vehículo.
Marítimo / militar	Se emplea como material de blindaje en la carrocería de vehículos ligeros, en la construcción de submarinos nucleares y en la fabricación de misiles. En la construcción naval se fabrican hélices y ejes de timón, intercambiadores de calor, condensadores y conducciones de centrales que utilizan agua de mar como refrigerante.
Aéreo	En la fabricación de álabes de las turbinas, escapes, discos de ventilación, estructuras tales como los bordes de las alas. Su utilización se ha generalizado con el desarrollo de la tecnología aeroespacial, soportando las condiciones extremas de frío y calor que se dan en el espacio.
Construcción	Se han empleado láminas delgadas de titanio para recubrir algunos edificios de forma decorativa.
Deportivo	Equipos deportivos tales como bicicletas, palos de golf, raquetas de tenis, cañas de pescar, cascos de fútbol americano, etc.
Otros	La industria joyera, fabricantes de artículos del hogar (utensilios de cocina), como aquellos fabricantes dedicados a la estructura de equipos eléctricos.

### 3.3.4 El titanio en el sector de transporte aéreo

La industria aeronáutica ha experimentado en las últimas décadas un desarrollo exponencial a nivel nacional, situándose España entre los principales países europeos tanto en nivel de producción como de generación de empleo [10, 12-15].

A pesar de esta buena situación, los continuos retos tecnológicos a los que se enfrenta esta industria, unidos a la fuerte competencia a nivel internacional, obligan al desarrollo de nuevas estrategias que refuercen la competitividad de este sector. De este modo, uno de los factores claves radica en la mejora del rendimiento de los procesos de fabricación utilizados en esta industria, desde un punto de vista funcional, económico, energético y medioambiental.

En concreto, en este trabajo se analiza la importancia del uso que ha logrado el titanio en el sector de transporte aéreo, por su empleo en zonas críticas de la aeronave debido a sus elevadas propiedades mecánicas, incluso a altas temperaturas; su excelente resistencia a la corrosión, logrando altos niveles de estabilidad térmica y química; y sobre todo la gran reducción de peso que supone su uso en comparación con otros materiales (Figura 3.6).



**Figura 3.6** Demanda de materia prima para el sector aéreo. Adaptada [16].

Tal como se observa en el gráfico, el 48% de la demanda en dicho sector presenta al aluminio como material estratégico. Sin embargo, en ciertas áreas donde la fatiga o corrosión ha sido un problema recurrente, el titanio es utilizado como sustituto del aluminio, cuando los requisitos de temperatura exceden las capacidades de éste (~150 °C). No obstante, aunque su porcentaje en proporción a la demanda global sea de un 11%, el titanio suele emplearse para reducir peso mediante la sustitución de las aleaciones de acero en zonas estructurales del avión (Tabla 3.2).

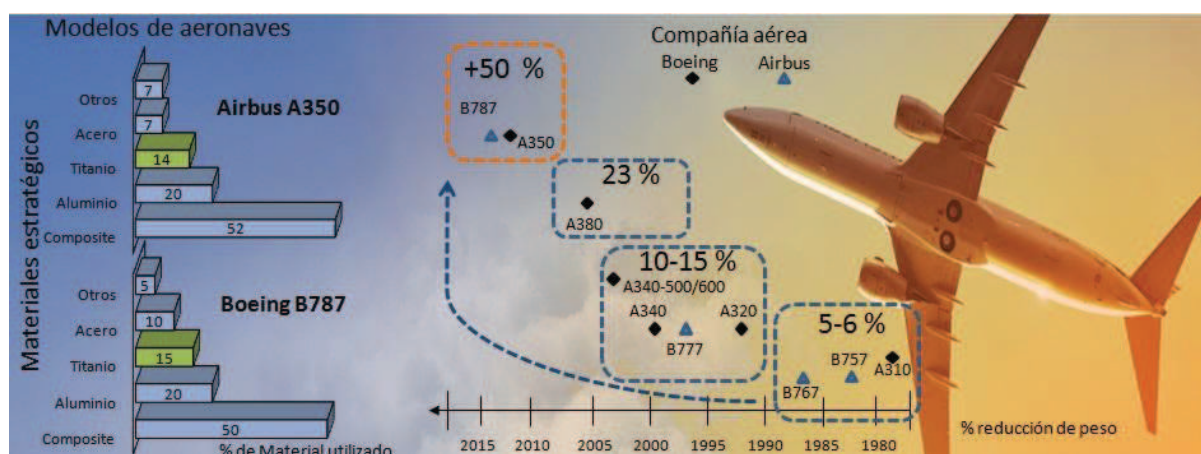


**Tabla 3.2** Partes estratégicas de la aeronave donde se emplean aleaciones con base Ti [17].

Componentes		Tipo de aleación
Estructura de avión	Tubería hidráulica	Ti3Al2.5V
	Suelo/ piso	CP-Ti
	Tren de aterrizaje	Ti10V2Fe3Al, Ti-6-6-2
	Muelles	Ti15V3Cr3Sn3Al
	Marcos de ventanas	Ti6Al4V
Turbina	Ventilador y cuchillas	Ti6Al4V, Ti6-2-4-2S
	Rotor (disco)	Ti6Al4V, Ti6-2-4-2S
	Rotor (tambor)	Ti6Al4V, Ti6-2-4-2S
	Compresor	Ti35V15Cr
	Boquillas	TIMETAL21S

Actualmente existen numerosas investigaciones que identifican las ventajas de uso [2, 18, 19] y la importancia que aporta este material en la innovación tecnología del sector aéreo.

Otro factor de gran importancia es el coste, pues tanto el aluminio como el titanio absorben un 53% del coste total, equivalente a 3.4 billones de dólares. No obstante, no es un impedimento para su uso ya que ofrece grandes beneficios. En la actualidad, la industria aeronáutica se encuentra liderada por dos grandes compañías: Airbus y Boeing, focalizando en la mejora del diseño estructural y dinámico de sus aviones sus máximos desarrollos tecnológicos. Parte de dicha estrategia se encuentra en el uso de materiales estratégicos tales como composites y aleaciones ligeras. Su elección busca una reducción de peso en la aeronave. En la Figura 3.7 se comparan dos modelos de aeronaves, identificando el porcentaje de material involucrado en su diseño y el de reducción en peso [20].

**Figura 3.7** Comparación de compañías en relación al material empleado y % reducción en peso.

Se observa que la nueva generación de aeronaves incorpora nuevos materiales ligeros, de alta resistencia en peso, permitiendo una reducción de consumo de combustible de hasta un 20%. Alrededor del 15% de los componentes claves están fabricados por

aleaciones de titanio, debido a que permite sustituir algunos componentes fabricados con acero, como el tren de aterrizaje o la cabeza del rotor de ciertos helicópteros.

Otra aplicación de gran impacto se encuentra en los conductos hidráulicos de la aeronave, logrando reducir un 50% de su peso total. La compatibilidad química a altas temperaturas y su baja densidad hace que sea un metal factible para la fabricación del depósito de combustible.

Finalmente, la cualidad de mayor impacto del titanio es su alta resistencia a la corrosión y estabilidad térmica, por lo que es empleado en la fabricación de sistemas de tubería de refrigeración.

### 3.4 Propiedades del Titanio

La selección de los materiales es un factor muy importante tanto para la funcionalidad de las piezas como para la flexibilidad de su fabricación. Sin embargo es difícil que un material cumpla con ambos requisitos, cosa que el titanio si verifica. Para lograr un máximo nivel de calidad en su producción es necesario tener un profundo conocimiento las propiedades y características que brinda este material.

El titanio posee grandes ventajas en comparación con otros metales, destacando sus propiedades mecánicas, físicas y químicas. En referencia a sus propiedades mecánicas y físicas, éstas se acentúan por ser un metal duro, resistente y más ligero que el acero, a la vez que dúctil y maleable. Tal y como se indicó anteriormente, el uso del titanio viene principalmente motivado por el factor peso y por su resistencia a niveles muy corrosivos. Por otro lado, es uno de los metales más resistentes a los ácidos, encontrándose por ello su mayor aplicación en procesos metalmecánicos. Otras características de gran importancia son su buena tenacidad y su excelente ductilidad. Sin embargo, su baja conductividad térmica origina problemas de calentamiento local y dificulta los tratamientos térmicos [21].

Por su parte, desde el punto de vista químico, el titanio es un elemento altamente reactivo, especialmente a elevadas temperaturas. A baja temperatura presenta una buena resistencia a la corrosión. No es atacado por el oxígeno atmosférico, la humedad, las soluciones alcalinas ni los ácidos diluidos. Alrededor de los 1000° C se une directamente a la mayoría de los no-metales. Su combustión con oxígeno forma el dióxido ( $\text{TiO}_2$ ), mientras que en atmósfera de nitrógeno forma el nitruro ( $\text{TiN}$ ). Finalmente, descompone el vapor de agua y reacciona con los halógenos formando los tetrahalogenuros.

El titanio forma sus compuestos fundamentalmente con las valencias 2, 3 y 4. Los compuestos de titanio (II) y titanio (III) son reductores y se transforman con facilidad en Ti (IV), que es el estado de oxidación más estable y común, dando lugar a compuestos esencialmente covalentes. Por otro lado, el titanio forma varios óxidos dobles y oxisales [22].

El titanio es un elemento altamente reactivo y presenta la transformación alotrópica de una estructura hexagonal densa a temperatura ambiente. Sus propiedades, tanto químicas como físicas, se observan en la Tabla 3.3.



**Tabla 3.3** Propiedades del Titanio.

Química		Física	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Símbolo químico	Ti	Punto de ebullición	3560 K
Número atómico	22	Calor de fusión	15.45 kJ/mol
Grupo y Periodo	4	Electronegatividad	1.54
Densidad	4507 kg/m <sup>3</sup>	Presión de vapor	0,49 Pa a 1933 K
Masa atómica	47.867 u	Conductividad eléctrica	$2.38 \cdot 10^6$ S/m
Punto de fusión	1941 K	Conductividad térmica	21.9 W/(K·m)

El titanio tiende a presentarse en dos estructuras cristalinas diferentes. A bajas temperaturas cristaliza en forma hexagonal compacta (fase  $\alpha$ ) y, por encima de una temperatura aproximada de 882 °C, cristaliza en una estructura cúbica centrada en el cuerpo (fase  $\beta$ ).

El diferente comportamiento frente a la deformación de los dos tipos de fases permite disponer de un metal resistente y poco deformable a temperatura ambiente en la fase  $\alpha$  y fácilmente deformable en la fase  $\beta$  [23, 24].

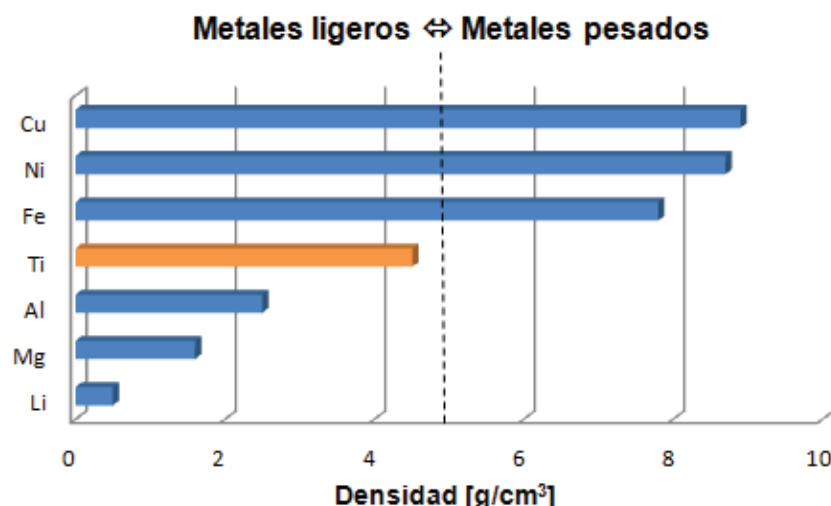
Una vez analizadas sus propiedades, resulta pertinente señalar las ventajas físicas y mecánicas del titanio frente a otros materiales, dado que posee una gran resistencia y dureza, al igual que una muy baja corrosión frente a ataques químicos y una amplia ventaja mecánica (Tabla 3.4).

**Tabla 3.4** Comparativa de propiedades del titanio con diversos metales ligeros [17].

Propiedades	Ti	Fe	Ni	Al
Temperatura de fusión (°C)	1670	1538	1455	660
Transformación alotrópica (°C)	882 $\alpha$ a $\beta$	921 $\gamma$ a $\alpha$	NA	NA
Estructura cristalina	bcc a hcp	fcc a bcc	fcc	fcc
Temperatura ambiente (GPa)	115	215	200	72
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	4.5	7.9	8.9	2.7
Resistencia a la corrosión	Muy alta	Baja	Media	Alta
Reactividad con el oxígeno	Muy alta	Baja	Baja	Alta
Coste de material	Muy alto	Bajo	Alto	Medio

Como se puede observar, el valor de las propiedades del titanio suele superar el de otros metales. Su resistencia a la corrosión es muy elevada, por lo que el Ti y sus aleaciones pueden ser comparables con las aleaciones de Al, para algunas aplicaciones.

El titanio se considera dentro de la gama de aleaciones ligeras, debido a su densidad (4.5 g/cm<sup>3</sup>). Este valor indica que se encuentra por debajo del límite de los metales pesados (Figura 3.8).



**Figura 3.8** Densidad del Ti frente a otros metales. Adaptada [25].

Tal como se observa, el titanio presenta una resistencia excepcional, en relación con su peso específico. Sin embargo, las aleaciones con base de titanio pueden tener distintos comportamientos dependiendo de su aplicación. En su mayoría tienen una conductividad eléctrica alta y sus coeficientes de expansión térmica son relativamente bajos. Otra característica mostrada de forma esquemática es su nivel bajo de conductividad térmica; logrando compaginar su alta resistividad térmica.

### 3.5 Clasificación de las aleaciones de Titanio

Se ha indicado que la versatilidad que presenta el titanio permite obtener aleaciones con microestructuras de tipo  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\alpha+\beta$ . El titanio, por naturaleza, tiende a alearse con otros elementos y, como se mencionó con anterioridad, a estas facetas se deben la modificación de su temperatura en el proceso de transformación alotrópica, pudiendo clasificar las aleaciones en cuatro grupos diferentes. Al combinarse con otros elementos, tales como el aluminio, el oxígeno o el hidrógeno, se estabiliza en fase  $\alpha$ , mientras que al incrementar la temperatura, se logra transformar en  $\beta$ . Su combinación con vanadio, tántalo, molibdeno e incluso con niobio, provoca que se establezca en fase  $\beta$ , haciendo incluso que ésta sea estable a temperatura ambiente.

Como se indicó al inicio de este apartado, del titanio se obtienen diversos tipos de aleaciones, las cuales se diferencian por la diversidad de sus propiedades y por su aplicación. Se comentarán individualmente cada una de ellas, así como de forma esquemática, en la Tabla 3.4.

- Aleaciones tipo  $\alpha$ : presentan poca ductilidad. Contienen normalmente un 5% de aluminio y 2.5% de estaño; ambos elementos son estabilizadores de la fase, y endurecedores por solución sólida. Estas aleaciones tienen una buena resistencia a la corrosión y a la oxidación, manteniendo su resistencia a elevadas temperaturas, presentando una buena soldabilidad y, normalmente, una aceptable ductilidad, a pesar de su estructura hexagonal. En cambio, las aleaciones cuasi  $\alpha$  tienen poca cantidad de elementos betágenos.

- Aleaciones de tipo  $\alpha+\beta$ : pueden tratarse térmicamente para obtener altas resistencias. La aleación se solubiliza cerca de la temperatura de transformación en fase  $\beta$ , lo que permite que todavía quede cierta cantidad de fase  $\alpha$ , para evitar el crecimiento de grano. Después, la aleación se enfría rápidamente para formar una solución sólida sobresaturada estable. La aleación *Ti6Al4V* se clasifica dentro de este grupo, destacando su baja conductividad térmica, elevada dureza y bajo módulo de elasticidad. Otro factor importante de este tipo de aleación son las diferentes microestructuras que se pueden formar con un procedimiento termomecánico, correspondientes a laminar, equiaxial o bimodal.
- Aleaciones tipo  $\beta$ : presentan buena resistencia en frío, aunque con elevadas adiciones de vanadio o de molibdeno producen una estructura enteramente  $\beta$  a temperatura ambiente. Muestran gran capacidad para ser endurecidas térmicamente. Sus aplicaciones incluyen remaches de alta resistencia, vigas y otros elementos estructurales para uso aeroespacial.

**Tabla 3.5** Aleaciones del Titanio.

Propiedades	Fases del titanio		
	$\alpha$	$\alpha+\beta$	$\beta$
Densidad	+	+	-
Fuerza/ dureza	-	+	++
Ductilidad	-/+	+	+/-
Tenacidad	+	-/+	+/-
Corrosión	++	+	+/-
Oxidación	++	+/-	-
Soldabilidad	+	+/-	-

Una vez identificadas las diferentes fases que puede adquirir diversas aleaciones de Ti, se procede a mencionar los principales procesos de fabricación a los que es sometido este metal: fundición, forja, soldadura, extrusión, embutición, mecanizado, fresado químico, rectificado de precisión, entre otras. Sin embargo, a nivel comercial existe una gran variedad de aleaciones provenientes del titanio, clasificadas según la concentración de cada elemento aleante, con el propósito de mejorar la combinación de diferentes características mecánicas, resistencia al calor, conductividad, microestructura, ductilidad o resistencia a la corrosión.

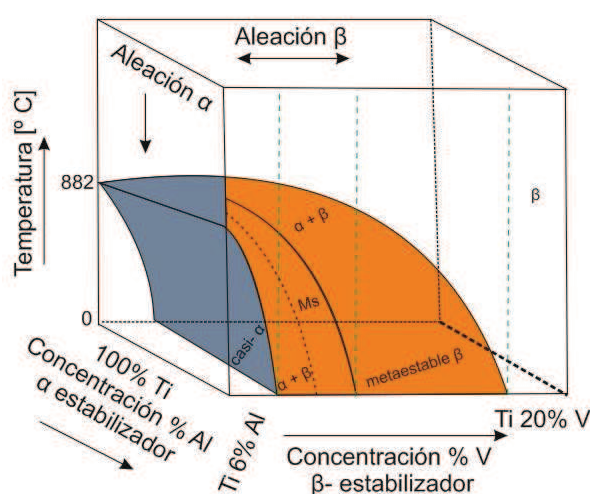
Actualmente existen más de 100 aleaciones de titanio, pero solo del 20 al 30% son utilizadas de forma comercial, encontrándose simplificadas y codificadas en normas los requerimientos necesarios para cada tipo de aleación, sus criterios de producción y contenido en masa: ISO 22960:2008 [26], ISO 22961:2008 [23], ISO 22962:2008 [27], ISO 22963:2008 [28]; en ASTM B381-09 [29], ASTM B265-15 [30], ASTM B862 -14 [31]; y finalmente en la UNE 38723:1981 [32].

### 3.6 Aleación Ti6Al4V (UNS R56400)

Finalmente, con este punto se pretende caracterizar el comportamiento de la aleación *Ti6Al4V* (UNS R56400) y su aplicación de forma global. Por ello, es pertinente señalar algunas reseñas bibliográficas a fin de identificar los inicios en que fue desarrollada y utilizada, a partir de los años 50. El incremento de su consumo fue favorecido principalmente por el sector aéreo, seguido del médico, automoción y químico. Todos ellos se basan en sus propiedades únicas en comparación con el resto de las aleaciones derivadas del titanio [33-35]. Su porcentaje de uso equivale al 50% de la producción total del titanio en forma de metal [17]. Como se indicó en los párrafos anteriores, este metal ligero está en constante evolución y, por consiguiente, genera un panorama de incógnitas por descubrir.

#### 3.6.1 Características generales de la aleación Ti6Al4V (UNS R56400)

Esta aleación es considerada de tipo  $\alpha + \beta$  y, como se puede deducir de su denominación, contiene un 6% de aluminio y un 4% de vanadio. La adición de aluminio incrementa la temperatura entre la fase alfa y beta, mientras que el vanadio disminuye dicha temperatura, empleándose cuando se requiere una alta resistencia mecánica y altas temperaturas (Figura 3.9). Esta combinación (Al y V en aleaciones con base de titanio) es una de las más comunes debido a que compite de forma directa con los aceros y las superaleaciones de base de níquel.



**Figura 3.9** Esquema representativo de cambio de fase de la aleación Ti6Al4V.

En la Tabla 3.6 se muestran las propiedades que caracteriza esta aleación.

**Tabla 3.6** Propiedades de la Ti6Al4V. Adaptada [25].

Propiedades químicas	Propiedades Físicas	Propiedades Mecánicas
C < 0.08% FE < 0.25% N <sub>2</sub> < 0.05% O <sub>2</sub> < 0.2% Al 5.5 – 6.76% V 3.5-4.5% H <sub>2</sub> (lamina) < 0.015% H <sub>2</sub> (Barra) < 0.0124% Ti hasta completar 100%	Densidad 4.42 g/cm <sup>3</sup> Punto de fusión 1649 °C Calor específico 560 J/kg·°C Resistencia eléctrica 170 Ω·cm Conductividad térmica 7.2 W/m·K Coeficiente de dilatación 8.6 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Resistencia a la tracción: 896 MPa Módulo elástico: 827 MPa Dureza Rockwell: 36 RC Ductilidad: 10%

La aleación *Ti6Al4V* puede presentarse en dos formas, dependiendo del tratamiento térmico a la que fue sometida (precipitado o solubilizado), lo que afecta a su comportamiento al ser trabajada. Esta diferencia solo se verá afectada en su dureza y en su módulo de elasticidad, resultando que *Ti6Al4V* en precipitado tiende a ser más difícil de trabajar. Esta breve descripción permite recrear las cualidades que identifican dicha aleación.

### 3.7 Mecanizado de la aleación Ti6Al4V (UNS R56400)

En esta sección se realiza una recapitulación sobre las diversas investigaciones relacionadas con el mecanizado de la aleación *Ti6Al4V*, para comprender los posibles efectos encontrados durante la etapa experimental de esta tesis y lograr una interpretación basada en datos reales, en comparación con las experiencias adquiridas por otros investigadores.

En los últimos años, diversos grupos de investigación españoles están trabajando en temas relacionados con el conformado de componentes de aleaciones ligeras mediante el proceso de mecanizado. Tal es el caso de la Universidad de Cádiz y la Universidad de Málaga. Sus últimas investigaciones, publicaciones y tesis doctorales establecen un vínculo con este proyecto [36-40]. Sin embargo, esta tesis propone un desarrollo alternativo y comparativo, para la caracterización del mecanizado de la aleación *Ti6Al4V* a través del análisis morfológico de la viruta, en función de ciertos parámetros tecnológicos asociados al proceso. Por lo tanto, es conveniente subdividir esta sección en relación a las variables de los estudios principales de esta tesis: morfología de la viruta, fuerzas de corte y desgaste de herramienta, todas ellas relacionadas con el proceso de mecanizado.

#### 3.7.1 Análisis morfológico de la viruta durante el mecanizado de Ti6Al4V

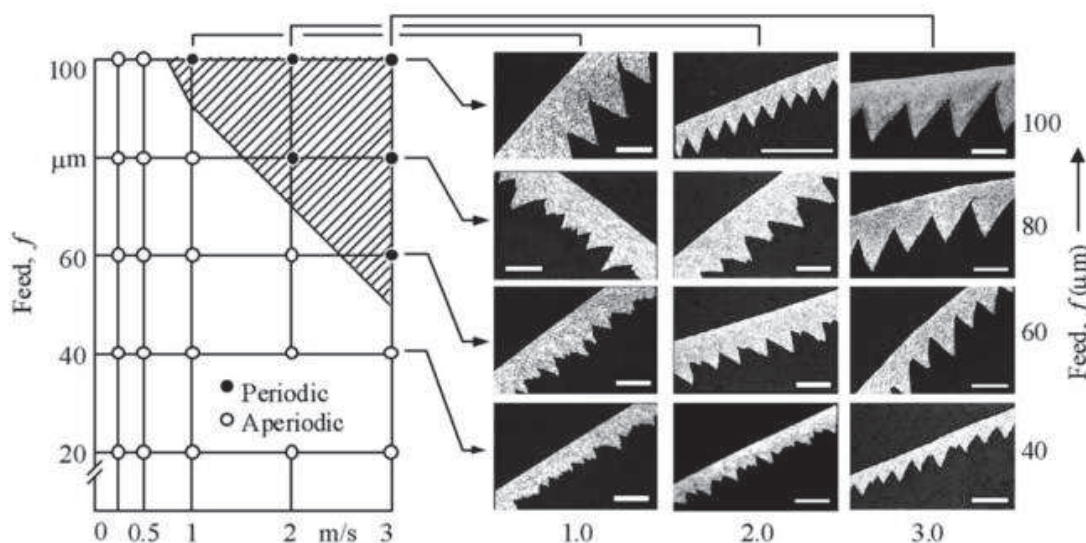
Uno de los principales retos a los que se enfrenta el sector aeronáutico es la innovación en la fabricación de aeronaves más eficientes, precisándose el desarrollo de nuevos materiales alternativos, entre los que destacan las aleaciones ligeras (en este caso en particular se hablará de las aleaciones con base de titanio), debido a sus cualidades de baja densidad y excelentes propiedades mecánicas. Estas propiedades hacen que sean muy utilizadas en la fabricación de componentes estructurales para aeronaves. En su fabricación se suelen

utilizar distintos procesos de conformado, siendo el mecanizado uno de los más empleados. El estudio y optimización de estos procesos suele ser complejo dado el gran número de variables que intervienen en él.

En este sentido, el análisis de la morfología de la viruta obtenida durante el mecanizado suele ser un factor de especial relevancia, dada su relación con otros factores que afectan de forma notable al rendimiento del proceso, como el desgaste de la herramienta de corte o la integridad superficial de la pieza mecanizada. Este análisis adquiere una mayor relevancia en los procesos de mecanizado que utilizan técnicas con bajo impacto medioambiental, como es el caso del mecanizado en seco. Bajo estas condiciones, las temperaturas alcanzadas en la zona de corte son muy elevadas, dando lugar a fenómenos de incorporación de material mecanizado a la herramienta, que alteran la morfología de la viruta y que, a veces, dificultan su evacuación.

Por ello, la monitorización y control de la viruta es un aspecto a tener en cuenta en la mejora del rendimiento de los procesos de mecanizado. En consecuencia, es importante conocer el comportamiento general de la aleación *Ti6Al4V*. Pese a sus problemas, esta aleación tiende a generar viruta segmentada, debido a su limitada ductibilidad. La aparición de viruta segmentada es un fenómeno positivo, pues facilita su evacuación, pero produce una inestabilidad constante en el proceso de corte. Este apartado tiene como finalidad identificar, mediante métodos tanto experimentales como analíticos, los parámetros de corte más influyentes durante el mecanizado de esta aleación.

Para ello, fue necesario recurrir a las observaciones realizadas por J. Barry [41], quien identifica mediante un corte ortogonal la inestabilidad de su forma, e identifica que la viruta, bajo diversos rangos de trabajo en función de  $f$  y  $V_c$ , muestra una transición en su forma, pasando de un estado no periódico (bajos valores de  $f$  como  $V_c$ ) a otro periódico, debido al aumento de las condiciones de mecanizado (Figura 3.10).



**Figura 3.10** Clasificación de viruta de *Ti6Al4V* en función de los parámetros de corte [41].

Al comparar la transición de la viruta, se observa que a medida que aumenta la velocidad de corte la viruta va sufriendo un cambio significativo; es decir, sus segmentos son más



definidos. Esto se debe al aumento de temperatura generada en el corte que sufre la aleación, en este caso de fase (de  $\beta$  a  $\alpha$ ), provocando un aumento en la ductibilidad en la zona de corte.

En este punto es conveniente citar los primeros estudios desarrollados por K. Komanduri o R. Recht [42-44], pioneros en evaluar el mecanismo de formación de la viruta mediante el mecanizado de aleaciones de titanio. Sus aportaciones, hasta la fecha, son de gran utilidad científica al valorar la zona de deformación plástica causada durante el corte, identificando que la viruta se encuentra formada por bandas adiabáticas provocadas por el alto nivel de tensiones generadas durante el corte.

Basadas en los anteriores, se encuentran los estudios ejecutados por A. Molinari [45], para conocer el grado de influencia de los parámetros de corte en la propia geometría de la viruta (en su sección). Determinando de forma experimental que los segmentos de viruta se ven afectados por la conductividad térmica del material. En sus estudios emplea diversos modelos que le permiten determinar el grado de afectación; entre ellos, se encuentra el determinar la frecuencia de la viruta, que depende del número de segmentos emitidos entre el tiempo de corte.

Otro factor importante en los estudios mencionados es la relación de la temperatura generada al contacto de la herramienta y la superficie mecanizada, que se incrementa de forma constante debido a la reactividad química que muestra el titanio. Por esta razón, la viruta forma parte del medio de transporte calorífico causado por el cizallamiento y está relacionada con el desgaste de la herramienta de corte.

En otro orden, dentro de la morfología de la viruta se encuentran los aspectos geométricos que la conforman. Existe un elevado número de estudios que dirigen su atención a conocer el comportamiento del material cuando se emplean diferentes geometrías de corte y el papel que establece la viruta. De esta manera, se describen algunos artículos en los que se ha basado esta tesis.

Tal es el caso de las aportaciones del grupo de investigación realizado por la Universidad de Cádiz, quienes emplean metodologías relacionadas con la caracterización geométrica de la viruta, relacionadas con el factor de acotamiento de la viruta durante el mecanizado en seco de aleaciones con base de titanio, en virtud del proceso de corte de manera ortogonal [37, 46, 47]. Dichos estudios fueron realizados con diversos parámetros de corte a fin de evaluar la longitud de contacto en función de las mediciones realizadas en la viruta, a través de su espesor y anchura. Para ello, dentro de su estudio, emplearon técnicas de microscopía óptica que facilitaron su análisis. Sus resultados permiten identificar la fuerte relación con dos parámetros de corte: la velocidad de corte y el avance. A su vez, se identifica que dicho factor de acortamiento se encuentra ligado con la maquinabilidad del material, en lo que corresponde a su aspecto geométrico, dependiendo de forma directa con la velocidad de avance.

Dentro de este marco, es importante conocer la maquinabilidad de la aleación a través de diversos estudios tales como A. Shokrani [48] y E.O. Ezugwu [49], que proporcionan una breve introducción sobre los metales difíciles de mecanizar, encabezados por las aleaciones

de titanio. En el capítulo anterior, se definió el concepto de maquinabilidad como la aptitud que muestra el material para ser mecanizado. Sobre este tema se cita a M. Kikuchi [50], debido a que sus estudios se centran en evaluar la maquinabilidad de ciertas aleaciones derivadas del titanio, entre ellas *Ti6Al4V*, mediante el proceso de fresado. Sus observaciones tienen como base evaluar las fuerzas de corte en función de la geometría de la viruta, concluyendo que, a pesar de tener una baja maquinabilidad y conductividad térmica, o una alta reactividad química, es posible obtener rangos de trabajo aceptables que permiten el rendimiento en el mecanizado de estas aleaciones.

Más estudios relacionado con el tema fueron los realizados por G. Sutter [51] y A. Gente [52], quienes consideran altos rangos de velocidad de corte durante el mecanizado de la aleación *Ti6Al4V*; a su vez, observan el mecanismo de formación de la viruta mediante diversos ángulos de corte. En base a sus resultados, determinan que la formación de la viruta se ve afectada por el incremento de la velocidad de corte, principalmente en su espesor. En dichos estudios se identifica la variación de las fuerzas de corte en función del grado de segmentación de la viruta (ambos están relacionados tanto con  $f$  como con  $V_c$ ). El grado de segmentación es de gran interés, ya que forma parte de los indicadores que determinan el ciclo de vida de la herramienta de corte.

Prosiguiendo en esta sección, se tiene en consideración ciertas aportaciones realizadas mediante elementos finitos, relacionadas con la morfología de la viruta y con la aleación estudiada. Aquí se pueden valorar las investigación realizadas por M. Calamaz [53, 54], que analiza el comportamiento elástico que sufre el material, durante el mecanizado de la aleación *Ti6Al4V*, a través de la ley de Johnson Cook, mediante la aplicación de técnicas de simulación por elementos finitos (software FORGE 2005®). Dentro de su desarrollo experimental, enfatiza que cada material muestra distinto comportamiento, aunque se hayan realizado bajo las mismas condiciones de corte. Por ello, es conveniente evaluar de forma particular cada material; por ello esta investigación tiene un valor importante en el ámbito científico, pues su estudio está enfocado a conocer las propiedades termomecánicas del titanio: elasticidad, plasticidad, comportamiento térmico y viscosidad. Sus resultados identifican el mecanismo de formación de la viruta en función de las fuerzas de corte y los parámetros de corte, obtenidos tanto de forma empírica como simulados analíticamente.

La inferencia de los datos de la Dra. Calamaz conllevan a una modificación de la ley de Johnson Cook, empleando la función matemática  $\text{TANH}$  (Hyperbolic  $\text{TANgent}$ ). Este término es empleado para modelar los efectos de tensión, cierto ablandamiento y fricción que sufre el material en la zona de corte (viruta). Sus comparaciones han demostrado que, efectivamente, esta modificación permite que la simulación se acerque más a los datos obtenidos experimentalmente; validando que es un modelo fiable. En lo que corresponde a las fuerzas de corte, éstas difieren un poco frente a los valores reales. Sin embargo, no descarta que este modelo pueda ajustarse al proceso de corte.

Los modelos numéricos en los procesos de corte son empleados cada vez más debido a que permiten conocer el comportamiento de todo material al ser transformado; por ello, es conveniente mencionar los estudios relacionados con este tema [55-57], en los que se



proponen modelos analíticos relacionados con la interface entre la herramienta de corte y el mecanismo de formación de la viruta.

En el caso de S. Bahi, su estudio está basado en la identificación de los efectos termomecánicos que sufre la aleación *Ti6Al4V* mediante la evaluación del proceso de cillazadura en la zona de interacción herramienta y viruta. Establece un modelo predictivo dividido en tres fases (deslizamiento, transición y adherencia); en cada fase establece los cambios periódicos sufridos por la viruta, su relación en la zona de contacto y las fuerzas de corte desarrolladas en el filo de corte. Dichos modelos muestran una tendencia cercana con los datos observados de forma experimental.

Sobre la tendencia sufrida en la herramienta de corte, se considera el desgaste tanto por adhesión como de abrasión. La importancia estriba en identificar la gran correlación entre la velocidad de corte y el ángulo de corte a través de un control termodinámico entre ambos.

### 3.7.2 *Análisis de las fuerzas de corte durante el mecanizado de Ti6Al4V*

En relación a las fuerzas de corte durante el mecanizado de la aleación *Ti6Al4V*, se encuentran los estudios realizados por A. Daymi [58]. El propósito principal de éstos es conocer los efectos de la velocidad de corte sobre el mecanismo de formación de la viruta y las fuerzas de corte. Para ello, empleó velocidades de corte moderadas, con un rango para  $V_c$  de 50 hasta 250 m/min. Esta variación permitió identificar que, a medida que incrementa su valor, la geometría de la viruta cambia de un extremo a otro; es decir, existe una ligera transición de su forma (sección de viruta más compacta) según el valor de  $V_c$ , que muestra una forma de dientes de sierra continua. Al aumentar  $V_c$ , tiende a ser segmentada.

Este fenómeno está íntimamente relacionado con la inestabilidad termoplástica que sufre el material en la zona de corte. Por ello, las fuerzas de corte reaccionan de manera favorable, siempre y cuando el rango de la  $V_c$  sea bajo, permitiendo obtener una temperatura de corte moderada en comparación a rangos altos. Este estudio identifica que a medida que incrementa  $V_c$  la deformación plástica disminuye.

Otro artículo que se relaciona con las observaciones de este tema es el de S. Sun [59], quien, en este caso, considera necesario caracterizar la variación de las fuerzas de corte mediante la frecuencia de segmentación establecida por la viruta durante ciertos parámetros de corte.

Algunos investigadores de la Universidad de Mondragón [60, 61] han demostrado, a través de diversos estudios comparativos de ciertas aleaciones de titanio (como es el caso del *Ti6Al4V* y *Ti10VFe3Al*), los posibles cambios microestructurales, el desgaste de la herramienta de corte, las fuerzas y la temperatura de corte. Estas investigaciones subrayan la importancia de establecer la mejor combinación de las variables mencionadas, debido a que poseen un grado de protagonismo para el aprovechamiento del mecanizado. Los ensayos demuestran que las fuerzas de corte se encuentran correlacionadas con el desgaste de la herramienta de corte; ambas están relacionadas con la temperatura de corte y la ductibilidad que caracteriza el material. En lo que corresponde al tema morfológico de la viruta, muestra una segmentación continua de bandas adiabáticas, y concluyen que dicho

fenómeno tiende a ser cíclico y es provocado por los esfuerzos térmicos y mecánicos del propio corte y, a su vez, causan daños considerables en la propia herramienta de corte.

### 3.7.3 *Desgaste de la herramienta de corte durante en el mecanizado de Ti6Al4V*

Otro factor de gran importancia para esta tesis doctoral es analizar el comportamiento que enfrenta la aleación *Ti6Al4V* mediante el análisis de los aspectos físicos de la herramienta de corte; en este caso, mediante el desgaste generando durante el proceso de corte.

Hay que recordar que el titanio se encuentra clasificado como un metal difícil de trabajar, debido a sus propiedades mecánicas, lo que implica un ligero aumento en las fuerzas de corte superiores a un acero comercial; por lo tanto, las tecnologías actuales aún no han logrado descifrar por completo su comportamiento, y es así que diversos investigadores han desarrollado modelos que permiten predecir la vida útil de la herramienta de corte, logrando concluir que el principal problema es que tiende a desgastarse de forma paulatina, al desgastar a la herramienta de corte, debido a que el titanio, por naturaleza, tiende a alearse de manera fácil (es decir, tiene una gran reactividad química con los materiales de la herramienta de corte, un módulo de elasticidad muy bajo y es más elástico que el acero), lo que se ve favorecido por las altas temperaturas que se alcanzan en la cara de desprendimiento. Éste fenómeno produce el desgaste; el material de la herramienta se alea con el titanio y se va adhiriendo, en partículas muy pequeñas, a la viruta, produciéndose una forma de cráter.

Sobre lo antes mencionado, se estima necesario recurrir a ciertas investigaciones relacionadas con este tema, tales como [15, 62, 63]; las cuales reúnen de forma experimental aquellos parámetros relacionados con la conductividad térmica ejercida en la zona de corte (relación herramienta de corte y superficie mecanizada). Los resultados demuestran que al incrementar la  $V_c$  la tensión elástica derivada de las aleaciones de titanio aumenta, provocando un acelerado cambio en la temperatura de corte (debido a su bajo valor de la conductividad térmica). Esta aportación sirve como base para identificar las zonas afectadas en la herramienta de corte (tanto en incidencia como en desprendimiento) y correlacionar los resultados en función de las variables que interfieren en el mecanismo de desgaste, como es el caso de la temperatura.

Otro factor a considerar fue el propuesto por el investigador M. Batista [37], mediante el análisis y evacuación del desgaste de herramienta por adhesión secundaria en el mecanizado en seco de la aleación *Ti6Al4V*. Uno de los principales resultados obtenidos de forma experimental permite identificar que la velocidad de corte influye de forma considerable en el desgaste de la herramienta de corte, provocando una acumulación de material en el filo de la herramienta y, como consecuencia, su fallo prematuro. Otro factor de interés fue conocer las causas de dicho efecto. Para ello, empleó estudios microscópicos en la herramienta de corte y determinó el crecimiento en el filo regresivo (*BUE*), el cual depende, en forma destacable, de la capa adherida en el filo de corte (*BUL*). La presente tesis doctoral tiene una estrecha relación con esta investigación, debido a que ambas están enfocadas en caracterizar la influencia del desgaste de la herramienta en función de la morfología de la viruta.

### 3.8 CONCLUSIONES

Resulta importante reconocer que, a pesar de las dificultades que tiende *Ti6Al4V* para ser mecanizado, sus resultados son muy favorables, lo que hace que este metal se encuentre en constante investigación y optimización de sus procesos de transformación. No obstante, se resumen, de forma breve, algunas conclusiones de manera individual.

- Se ha mostrado la demanda tecnológica relacionada con el desarrollo de materiales estratégicos para el sector aéreo, particularmente, de las aleaciones ligeras, habiéndose identificado el tipo de aleación más utilizada en dicho sector.
- Se ha identificado el uso actual de las aleaciones de titanio, así como también sus inicios, aplicaciones y generalidades. Dentro de este preámbulo se han descrito las ventajas que ofrece este material, centrándose este estudio en evaluar la aleación *Ti6Al4V*.
- Este capítulo ha permitido un mayor conocimiento de la caracterización del mecanizado de la aleación *Ti6Al4V*, mediante diversas variables de estudio, entre ellas, los aspectos geométricos, tanto de la viruta como de la herramienta de corte, y la relación de sus fuerzas de corte.
- Se ha indicado que el titanio muestra una baja conductividad térmica. Por ello, el material desprendido (viruta) durante el mecanizado tiende en su mayoría a soldarse en el filo de la herramienta, produciendo un posible fallo prematuro, debido a las altas temperaturas que puede generarse en la zona de corte.

## Referencias

- [1] M. F. Ashby. Materials and the environment: eco-informed material choice: Elsevier, (2012). ISBN:0123859727.
- [2] J. P. Immarigeon, R. T. Holt, A. K. Koul, L. Zhao, W. Wallace, J. C. Beddoes. Lightweight materials for aircraft applications. Materials Characterization, 35, (1995). 41-67.
- [3] Servicio Geológico Mexicano: Análisis por Elemento: Titanio (Ti) [Online]. Last Modified: 11/07/2016 Available: <http://portalweb.sgm.gob.mx/economia/es/tabla-periodica/596-analisis-por-elemento-titanio-.html>
- [4] J. A. Chapman A., T. Castella, P. Thompson, P. Willis. Enterprise and Industry. Study on Critical Raw Materials at EU Level. Oakdene Hollins and Fraunhofer ISI16/12/2013, (2013).
- [5] T. D. Kelly, G.R Matos. Historical statistics for mineral and material commodities in the United States (USGS): 2016 version. U.S. Geological Survey Data Series 140. Report 01-006 [Online]. Last Modified: 30-Mar-2016 Available: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/>.
- [6] T. Brown, N. Idoine, E.R. Raycraft, R. A Shaw, E. A. Deady, J. Rippingale, T. Bide, C. E. Wrighton, J. Rodley. World mineral production 2008-12: British Geological Survey, (2014). ISBN:0852727666.
- [7] P. Dewhuurst. Titanium sponge supply. Past, present and future. Roskill Consulting Group Ltd., (2013).
- [8] P. G. Esteban, E. M. Ruiz, L. Bolzoni, E. Gordo. Low-cost titanium alloys? Iron may hold the answers. Metal Powder Report, 63, (2008). 24-27.
- [9] C. Cui, B. Hu, L. Zhao, S. Liu. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. Materials & Design, 32, (2011). 1684-1691.
- [10] Política de la UE sobre Industria Espacial. Comunicación de la comisión al Parlamento Europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones, (2013).
- [11] M. C. Gabriele. Titanium. The infinite choice: International Titanium Association, (2011).
- [12] J. C. Cortés, P. Diego. Plan estratégico para el sector aeronáutico español (2008-2016). CDTI. Centro para el desarrollo tecnológico industrial, (2007).
- [13] Programa Estratégico de la Industria Aeroespacial. ProAéreo 2012-2020. Federación Mexicana de la Industria Aeroespacial, (2012).
- [14] Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation. European Commission, (2011).
- [15] S. H. I. Jaffery, P. T. Mativenga. Wear mechanisms analysis for turning Ti-6Al-4V—towards the development of suitable tool coatings. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58, (2012). 479-493.
- [16] K. Michaels. Aerospace Supply Chain & Raw Materials. ICF SH&E, (2014).
- [17] C. Veiga, J.P. Davim, A. J. R. Loureiro. Properties and applications of titanium alloys: a brief review. Rev. Adv. Mater. Sci, 32, (2012). 133-148.
- [18] F. H. Froes. Aerospace materials for the twenty-first century. Materials & Design, 10, (1989). 110-120.
- [19] D. King, O. Inderwildi, C. Carey. Advanced aerospace materials: past, present and future. Aviation and the Environment, (2009). 22-27.
- [20] Y. Bruhis, W. Sebring, D. Noland. (2007). Meeting the challenge of milling aerospace materials. Available:
- [21] F. C. Campbell. Manufacturing technology for aerospace structural materials: Elsevier, (2006). ISBN:978-1-8561-7495-4.
- [22] G. Welsch, R. Boyer, E.W. Collings. Materials properties handbook: titanium alloys: ASM international, (1993). ISBN:0871704811.

- [23] ISO 22961:2008. Titanium and titanium alloys: Determination of iron. Atomic absorption spectrometry. (2008).
- [24] H. R. Ogden, F. C. Holden. Metallography of Titanium alloys: Titanium Metallurgical Laboratory, (1958).
- [25] C. Leyens, M. Peters. Titanium and titanium alloys: Wiley Online Library, (2003).
- [26] ISO 22960:2008. Titanium and titanium alloys: Determination of iron: Molecular absorption spectrometry using 1,10-phenanthroline. (2008).
- [27] ISO 22962:2008. Titanium and titanium alloys: Determination of iron. Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. (2008).
- [28] ISO 22963:2008. Titanium and titanium alloys: Determination of oxygen. Infrared method after fusion under inert gas. (2008).
- [29] ASTM B381-09. Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Forgings. (2009).
- [30] ASTM B265-15. Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate. (2015).
- [31] ASTM B862-14. Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Welded Pipe. (2014).
- [32] UNE 38723:1981 Titanio y aleaciones de titanio para forja. Grupo alfa + beta. Aleación L-7301, Ti-6 Al 4 V. (1981).
- [33] X. Yang, C. Richard Liu. Machining titanium and its alloys. Machining Science and Technology, 3, (1999). 107-139.
- [34] RMI Metallography and Titanium alloy guide. Titanium Company.(2000)
- [35] F. Nabhani. Machining of aerospace titanium alloys. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 17, (2001). 99-106.
- [36] J. M. Gerez Miras. Estudio del torneado en seco de la aleación Ti6Al4V. Relaciones paramétricas para el acabado superficial. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, (2014).
- [37] M. Batista Ponce. Características de los mecanismos de adhesión secundaria y su influencia en el desgaste de herramientas de corte. Aplicación al mecanizado en aleaciones ligeras. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, (2013).
- [38] F. J. Trujillo Vilches. Análisis paramétrico del mecanizado en seco de la aleación UNS A97075. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, (2013). ISBN:978-84-9747-776-5.
- [39] Y. Sánchez, F.J. Trujillo , L. Sevilla, M. Marcos. Propuesta metodológica para la caracterización de la viruta en el torneado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V). XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (2014).
- [40] Y. Sánchez, F.J. Trujillo , L. Sevilla, M. Marcos. Estudio experimental de las fuerzas de corte durante el mecanizado con aleaciones de titanio. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, (2016).
- [41] J. Barry, G. Byrne, D. Lennon. Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41, (2001). 1055-1070.
- [42] R. Komanduri, B. F. Von Turkovich. New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys. Wear, 69, (1981). 179-188.
- [43] R. Komanduri. Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys. Wear, 76, (1982). 15-34.
- [44] R. Recht. Catastrophic thermoplastic shear. Journal of Applied Mechanics, 31, (1964). 189-193.
- [45] A. Molinari, C. Musquar, G. Sutter. Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti-6Al-4V: experiments and modeling. International Journal of Plasticity, 18, (2002). 443-459.

- [46] M. Batista, M. Calamaz, F. Girot, J. Salguero, M. Marcos. Using Image Analysis Techniques for Single Evaluation of the Chip Shrinkage Factor in Orthogonal Cutting Process. *Key Engineering Materials*, 504, (2012). 1329-1334.
- [47] M. Batista, J. Salguero, A. Gomez, S. Fernández, M. Marcos. SOM based Methodology for Evaluating Shrinkage Parameter of the Chip Developed in Titanium Dry Turning Process. *Procedia CIRP*, 8, (2013). 534-539.
- [48] A. Shokrani, V. Dhokia, S. Newman. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57, (2012). 83-101.
- [49] E. O. Ezugwu, Z. M. Wang. Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 68, (1997). 262-274.
- [50] M. Kikuchi, O. Okuno. Machinability evaluation of titanium alloys. *Dental materials journal*, 23, (2004). 37.
- [51] G. Sutter, G. List. Very high speed cutting of Ti–6Al–4V titanium alloy—change in morphology and mechanism of chip formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 66, (2013). 37-43.
- [52] A. Gente, Hoffmeister, H. W., Evans, C. J. Chip Formation in Machining Ti6Al4V at Extremely High Cutting Speeds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50, (2001). 49-52.
- [53] M. Calamaz. Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caractérisation de l'interface outil-copeau—Application a l'usinage de l'alliage de titane aéronautique TA6V. Université de Bordeaux. (2008).
- [54] M. Calamaz, D. Coupard, et al. Numerical simulation of titanium alloy dry machining with a strain softening constitutive law. *Machining Science and Technology*, 14, (2010). 244-257.
- [55] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre, E. Filippi. Numerical contribution to the comprehension of saw-toothed Ti6Al4V chip formation in orthogonal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 81, (2014). 77-87.
- [56] S. Bahi, G. List, G. Sutter. Modeling of friction along the tool-chip interface in Ti6Al4V alloy cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2015). 1-19.
- [57] M. Cotterell, G. Byrne. Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti–6Al–4V. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, (2008). 93-96.
- [58] A. Daymi, M. Boujelbene, S. B. Salem, B. H. Sassi, S. Torbaty. Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces. *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 1, (2009). 77-83.
- [59] S. Sun, M. Brandt, M. S. Dargusch. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, (2009). 561-568.
- [60] P. J. Arrazola, A. Garay, L. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, F. Le Maître. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *Journal of Materials Processing Technology*, 209, (2009). 2223-2230.
- [61] A. G. Sacristán, L. M. Iriarte, P. Arrazola. Estudio comparativo de la maquinabilidad de las aleaciones de titanio Ti6Al4V y Ti10V2Fe3Al. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (2014).
- [62] V. Norouzifard, M. Hamed. Experimental determination of the tool–chip thermal contact conductance in machining process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 84, (2014). 45-57.
- [63] N. Narutaki, A. Murakoshi, S. Motonishi, H. Takeyama. Study on Machining of Titanium Alloys. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 32, (1983). 65-69.







# CAPÍTULO 4

---

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

*Metodología para la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras de  
uso aeronáutico a través del análisis de la viruta*

---



## Índice

<b>4.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>4.1</b>
<b>4.2</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>4.2</b>
<b>4.3</b>	<b>Análisis de la aleación establecida para los ensayos .....</b>	<b>4.4</b>
<b>4.4</b>	<b>Planificación de los ensayos .....</b>	<b>4.6</b>
4.4.1	Determinación de las variables de estudio .....	4.6
4.4.1.1	Selección del proceso .....	4.8
4.4.1.2	Parámetros tecnológicos de corte .....	4.9
4.4.1.3	Condiciones del mecanizado .....	4.9
4.4.1.4	Herramienta de trabajo .....	4.10
4.4.2	Tipo de ensayo .....	4.12
4.4.3	Preparación del material .....	4.13
4.4.3.1	Suministro y adaptación del material de trabajo .....	4.14
4.4.3.2	Diseño de la preforma .....	4.14
4.4.3.3	Codificación de preforma .....	4.19
4.4.4	Diseño y ejecución del programa para adquisición de fuerzas de corte ...	4.20
<b>4.5</b>	<b>Ejecución de ensayos experimentales .....</b>	<b>4.25</b>
4.5.1	Codificación de ensayos .....	4.25
4.5.2	Protocolo de ensayo .....	4.27
4.5.3	Selección y trazabilidad de la muestra de estudio .....	4.28
<b>4.6</b>	<b>Análisis de los resultados basado en técnicas de monitorización.....</b>	<b>4.30</b>
4.6.1	Monitorización On-Line .....	4.31
4.6.2	Monitorización Off-Line .....	4.31
<b>4.7</b>	<b>Análisis metalográficos .....</b>	<b>4.32</b>
4.7.1	Estudios microscópicos .....	4.32
4.7.1.1	Estudios microscópicos a fragmentos de viruta .....	4.33
4.7.1.2	Tratamiento de imagen mediante el software ImageJ .....	4.36
4.7.1.3	Estudios microscópicos en la herramienta de corte .....	4.38
4.7.2	Estudios macroscópicos .....	4.38
<b>4.8</b>	<b>Caracterización previa de resultados .....</b>	<b>4.39</b>
4.8.1	Morfología de la viruta .....	4.39
4.8.2	Herramienta de corte .....	4.42
4.8.3	Fuerzas de corte .....	4.42
<b>4.9</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>4.43</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>4.45</b>



## 4.1 Introducción

El desarrollo inicial de esta investigación tiene su origen en una serie de reflexiones e ideas potenciales dirigidas a responder la demanda tecnológica en los procesos productivos que exige el sector aeronáutico [1], específicamente en el proceso de mecanizado, y desafíos relativos al desarrollo de nuevos métodos de trabajo que permitan optimizar este proceso. Por lo tanto, este capítulo tiene como finalidad establecer, de forma ordenada y sistematizada, una metodología estructurada en base a una serie de ensayos experimentales que permitan una reproducibilidad y una repetitividad del comportamiento del mecanizado a través del análisis de la viruta en correlación con los parámetros de corte. El objetivo de dicha metodología será enlazar los resultados a una expresión matemática (modelo numérico) que vincule la relación de las variables dependientes e independientes asociadas al mecanizado a través del análisis morfológico de la viruta.

Para lograr este propósito, se establecen los siguientes objetivos particulares:

- Visualización de la morfología de la viruta no solo como desecho metálico sino también como posible indicador que permita caracterizar el mecanizado, logrando contribuir en la toma de decisiones de ámbito práctico.
- Desarrollar una metodología experimental genérica que logre identificar los criterios que intervienen (variables de entrada/salida) en la formación de la viruta durante el mecanizado de aleaciones ligeras, mediante el proceso de torneado con geometría cercana al corte ortogonal.
- Diseñar una propuesta de trabajo dedicado a la preparación de la viruta en relación a los parámetros tecnológicos de corte mediante una serie de pautas determinadas por ensayos metalográficos (macroscópico y microscópico).
- Proponer un método de trabajo que permita analizar el estado geométrico de la herramienta de corte una vez finalizados los ensayos.
- Implementar un procedimiento óptimo para la captura e interpretación de fuerzas de corte durante el mecanizado.

- Establecer modelos matemáticos que caractericen al mecanizado mediante la viabilidad de los datos obtenidos de las variables de estudio.

## 4.2 Metodología

En relación a los objetivos particulares de este capítulo, se procede a continuación a describir el diseño metodológico, así como también los recursos para su implementación. Dada la importancia que tiene la metodología experimental (forma parte de la espina dorsal de esta tesis), este apartado tiene como propósito analizar de forma práctica el estudio sobre morfología de la viruta y su relación con parámetros tecnológicos de corte mediante el uso de técnica de monitorización *On-Line*, logrando caracterizar, en tiempo real, el comportamiento de la viruta, así como la captura de las fuerzas de corte durante su mecanizado. De igual forma, se pretende realizar el análisis de los parámetros geométricos de la viruta y la herramienta de corte aplicando, en este caso, la técnica de monitorización *Off-Line*.

Para ello, es necesaria la creación de una serie de procedimientos relacionados con el protocolo de experimental, y la captura de datos durante el proceso de corte y su análisis.

Este último paso se encuentra integrado por diversas técnicas durante la recogida de datos, con el propósito de su identificación en una situación concreta -aquellos aspectos del experimento que sufran una posible alteración durante el proceso de mecanizado.

Finalmente, se podrá apreciar que a partir de los datos experimentales obtenidos se consigue plantear un modelo paramétrico que permite predecir diversos valores claves del proceso en función de los parámetros tecnológicos aplicados.

Para lograr todo lo anterior, fue necesario establecer un diagrama de etapas, a fin de plasmar y organizar las actividades que permiten desarrollar la metodología experimental de esta tesis. Sin embargo, en cada una de las etapas existen procedimientos secundarios que serán detallados de forma general en este capítulo y en su mayoría estarán complementados por anexos para especificar a fondo la razón de ser de dicho punto.

Por consiguiente, surge la necesidad de proponer una programación de actividades que permitirá identificar los factores de uno en uno, logrando identificar la influencia en el mecanismo de formación de la viruta durante el mecanizado con aleaciones ligeras.

Para ello, se aplicarán técnicas para diseñar los experimentos bajo la ejecución de ensayos con diversos escenarios de trabajo, con el interés de justificar el alcance de esta investigación, mediante resultados que se ajusten en mayor medida a la realidad del proceso estudiado, visualizados en la Figura 4.1.

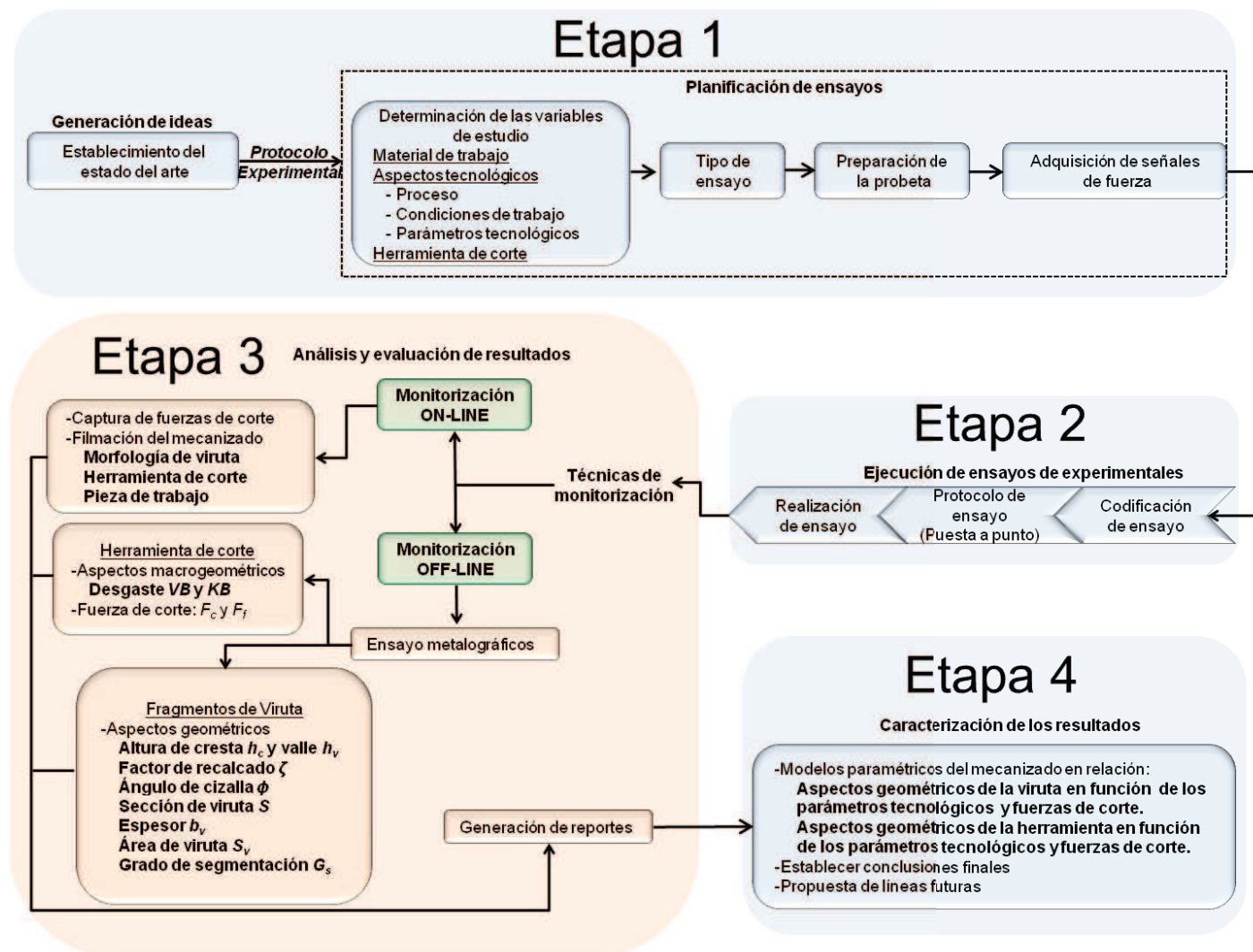


Figura 4.1 Esquema metodológico establecido en esta línea de investigación.

El esquema propuesto plasma la metodología establecida para este estudio, distribuida en 4 etapas principales, descritas a continuación:

- Etapa 1: Establecimiento del estado del arte (Capítulo 2 y 3) y planificación de los ensayos basados en las variables de estudio. Es un factor clave para el desarrollo de esta tesis, con el objetivo de dar a conocer los mecanismos de formación de la viruta y la determinación de las variables que interactúan durante el mecanizado de un componente. A su vez, resalta la importancia sobre el tipo de ensayo a realizar y el diseño establecido para la probeta de estudio. Finalmente, identificar el procedimiento más factible para la adquisición de fuerzas de corte en base a los distintos parámetros de corte; relacionados con los medios disponibles para su adquisición (equipamiento y forma de trabajo).
- Etapa 2: Ejecución de ensayos. En esta etapa se establece una serie de actividades que permiten la elaboración de los ensayos, abarcando desde la codificación del ensayo, preparación (*Set up*) del equipo, ejecución de cada ensayo, obtención y manipulación de muestras; con el objetivo de facilitar el análisis de los datos. Este conjunto de actividades conformarán el protocolo de ensayo.
- Etapa 3: Análisis y evaluación previa de resultados. Esta sección permite organizar y relacionar los datos para analizar los efectos encontrados durante la ejecución de los ensayos; mediante el uso de técnicas de observación. El principal interés de esta etapa está centralizado en identificar y ejecutar técnicas de trabajo que permitan un mejor control de los hallazgos encontrados en cada etapa. Permitiendo a su vez una trazabilidad de resultados antes de ser caracterizados; mediante la generación de una serie de reportes que permitan resumir su comportamiento.
- Etapa 4: Caracterización de los resultados. La finalidad de esta sección es dar a conocer los exponentes que representarán a los parámetros tecnológicos mediante un modelo matemático factible que proporcione el comportamiento del mecanizado. Por último, se proponen líneas futuras para las siguientes investigaciones.

#### **4.3 Análisis de la aleación establecida para los ensayos**

Desde la perspectiva más general, la selección del material de trabajo se ajusta a la demanda actual en el sector aéreo [2, 3], enmarcándose dentro de las líneas de investigación desarrolladas desde la Universidad de Málaga [4] por el grupo de investigación TEP933 (Ingeniería de Fabricación) y la Universidad de Cádiz [5, 6] a través del grupo TEP027 (Ingeniería y Tecnologías de Materiales y Fabricación), tal como se menciona en los capítulos anteriores, en relación a la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras. Esta investigación centra su interés en analizar el comportamiento de la aleación *UNS R56400*, conocida como *Ti6Al4V* grado 5, que contiene un 6% de aluminio y un 4% de vanadio.



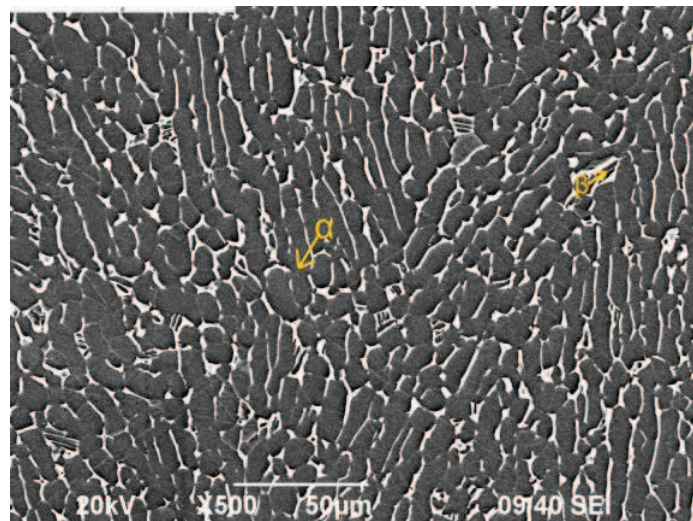
Se trata de una aleación de tipo  $\alpha + \beta$ , que puede presentarse en dos formas: a temperaturas bajas se comporta de forma hexagonal (fase  $\alpha$ ) y por encima de 880°C cristaliza en una estructura BCC (fase  $\beta$ ), formando una microestructura mixta. Esto provoca que esta aleación sea complicada de mecanizar debido a sus propiedades mecánicas, debido al ligero aumento en las fuerzas de corte.

Las tecnologías actuales aún no han logrado caracterizar por completo su comportamiento por lo que diversos investigadores han desarrollado modelos que permiten predecirlo, concluyendo que el principal problema proviene del desgaste de la herramienta de corte y de su relación con el mecanismo de formación de la viruta durante el mecanizado, el cual se analizará en este capítulo.

En consecuencia, el conocer a fondo el comportamiento del Ti permite entender si efectivamente tiene una capacidad para alearse con los materiales utilizados en las herramientas de corte, siendo lo que pretende comprobar con este estudio. Para ello se ha realizado una inspección metalográfica (espectrometría) al material de trabajo mediante la extracción de un fragmento de muestra, con la intención de conocer el porcentaje real de su composición química, a fin de realizar una comparación más exacta con respecto a los límites establecidos en las normas.

Para realizar dicho estudio fue empleado un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío JEOL modelo SM-6490LV, con software INCA Energy de Oxford Instruments Analytical, ubicado en los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación (SCAI) de la Universidad de Málaga.

En la Figura 4.2 se puede observar la microestructura de la aleación empleada para los ensayos, en la que se revela que la zona más oscura corresponde a la fase  $\alpha$ , que es donde se concentra aluminio, mientras las de tonalidad clara corresponden a la fase  $\beta$ , correspondientes a la ubicación del vanadio [7]. Este punto será tratado a detalle en la sección correspondiente al análisis de resultados, si bien sirve de base para comprender el comportamiento de esta aleación durante su mecanizado.



**Figura 4.2** Imagen mediante técnica de microscopía electrónica de energía dispersiva (EDS, *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) de la aleación Ti6Al4V

En la Tabla 4.1 se muestran un resumen de los resultados del informe emitido por dicho Servicio, mientras que el informe completo se incluye en el Anexo I (Reporte Metalográfico para *Ti6Al4V*). Puede apreciarse que el material analizado cumple los requisitos establecidos (Al: 5,5<6,29<6,76; V: 3,5<4,07<4,5).

**Tabla 4.1** Composición de la aleación *Ti6Al4V* (% en masa)

	C	Fe	N	O	Al	V	Ti
Pieza	0,08	0,164	0,05	0,05	6,29	4,07	Resto
Norma	0,08	0,25	0,05	0,02	5,5-6,76	3,5-4,5	Resto

#### 4.4 Planificación de los ensayos

Aunque en el apartado 4.2 se ha descrito de forma general el conjunto de las actividades necesarias para llevar acabado esta investigación, el propósito de este nuevo apartado es detallar de forma más específica las etapas necesarias para realizar la planificación de los ensayos.

##### 4.4.1 Determinación de las variables de estudio

Esta primera etapa se encuentra estrechamente vinculada con la identificación del objetivo general de esta tesis y, a su vez relacionada, con el establecimiento del estado del arte sobre la mediante el análisis de los estudios científicos desarrollados en la última década.

Este estado del arte se ha centrado en el proceso de conformado de componentes mecánicos fabricados con aleaciones ligeras, los cuales son ampliamente utilizados en la industria aeronáutica, en forma híbrida, y en partes estratégicas de elementos estructurales de vehículos de transporte [8] con requerimientos de alta resistencia mecánica, peso muy reducido y elevada compatibilidad electroquímica. Este es el caso particular de las estructuras laminadas metalo-compuestas (FML, *Fiber Metal Laminates*) de aleaciones ligeras y materiales compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP/Ti).

El montaje de estos elementos en las estructuras de las aeronaves se suele hacer mediante procesos basados en tecnologías de uniones mecánicas, que requieren previamente procesos de taladrado de los FML [9]. La mejora del rendimiento de estos procesos obliga a considerar el empleo de técnicas de taladrado en un solo paso (OSD, *One Shot Drilling*) con un compromiso entre los parámetros más adecuados para el taladrado del CFRP/Ti [10]. En las condiciones de taladrado OSD con CFRP/Ti, uno de los factores críticos que condicionan el proceso es la necesidad de efectuar el mecanizado en ausencia de fluidos de corte.

Con ello se pretende, por un lado, evitar la formación de obstáculos por compactación del polvo de fibra en los canales de evacuación de la viruta [11]. Por otro, se pretende utilizar técnicas de fabricación sostenible mediante la supresión del uso de sustancias con negativo impacto ambiental y cuyo reciclado supone un incremento en los costes de fabricación.

Bajo estas condiciones de mecanizado en seco, la propia generación de la viruta se convierte en un factor de especial relevancia, dado que las temperaturas que se producen en la zona de corte afectan de forma notable a la misma. Además, su evacuación puede verse dificultada por la aparición de fenómenos de incorporación de material de la aleación a las caras de desprendimiento e incidencia de la herramienta de corte [5].

La morfología de la viruta puede relacionarse con el desgaste de la herramienta y la integridad superficial de la pieza mecanizada, influyendo en la precisión dimensional y la continuidad del proceso, por lo que puede ser utilizada como un indicador de las condiciones de mecanizado [12-14]. Por ello, la monitorización y control de la viruta es un aspecto a tener en cuenta en la mejora del rendimiento de los procesos de corte.

Por otro lado, el mecanizado de la aleación *Ti6Al4V*, pese a sus problemas, presente como ventaja competitiva la tendencia a generar viruta segmentada, con muy poca deformación. La aparición de viruta segmentada es un fenómeno positivo ya que se facilita su evacuación, si bien produce cierta inestabilidad en el proceso de corte.

Por ello resultaría de interés disponer de un estudio detallado del proceso de formación de la viruta en el mecanizado de aleaciones ligeras, ya que reforzaría el conocimiento básico del proceso de mecanizado y permitiría seleccionar las condiciones más adecuadas de trabajo, dado el gran número de variables que intervienen en los procesos de mecanizado, lo cual hace que su estudio sea complejo, y que habitualmente se suele recurrir a simplificaciones que dan lugar a resultados que se alejan del comportamiento real del proceso [15, 16]. Dentro de este marco surge la necesidad de conocer la evolución de las fuerzas de corte, ya que éstas afectan de forma evidente al desgaste de las herramientas de corte, y que a su vez influye negativamente en la temperatura de corte, la calidad superficial de la pieza de trabajo y la precisión de las dimensiones deseadas.

Sobre la base de las ideas expuestas, en la Figura 4.3 se identifican las variables de estudio relacionadas con la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras (variables de salida o dependientes), en este caso empleando la aleación *Ti6Al4V*, a través del estudio morfológico de la viruta, en relación a los parámetros de tecnológicos establecidos para este proceso (variables de entrada o independientes).



**Figura 4.3** Esquema sobre las variables de estudio establecidas en esta tesis.

Tal como se muestra en la figura anterior, las variables de entrada para este estudio han sido los parámetros tecnológicos de corte  $V_c$ ,  $f$  y  $ap$ , los cuales permiten identificar las posibles variaciones generadas en el proceso, logrando predecir las condiciones óptimas del mecanizado. La combinación de los valores de estos parámetros tecnológicos son catalogadas como escenarios de corte.

Y en lo que se refiere a las variables de salida, se ha considerado la evaluación de la morfología de la viruta a partir de un análisis micro y macro geométrico de ella. Como análisis microgeométricos, se ha procedido a la medición de la geometría de la viruta. Finalmente, para los análisis macrogeométricos se ha empleado su aspecto físico, aplicando los criterios de la normativa ISO 3685:1993 como UNE 16148 [17, 18].

Otro factor que también se ha incluido como variable de salida está relacionado con la evolución de las fuerzas de corte. Para ello se estableció un procedimiento práctico de captura, en tiempo real, de las fuerzas aplicadas en el corte, con la intención de determinar el grado de maquinabilidad de la aleación durante su mecanizado.

Finalmente, otra de las variables de salida considerada es el análisis de la herramienta mediante una evaluación de forma cualitativa, lo que permite identificar los posibles mecanismos que originan el desgaste físico de ella. Para ello, es necesario establecer estudios a escala microscópica, con objeto de identificar de forma más concreta el tipo de desgaste generado en cada escenario de corte.

De acuerdo a todo lo anterior, las variables de entrada permiten caracterizar el comportamiento de la aleación *Ti6Al4V* durante su mecanizado, en función de los resultados adquiridos de forma experimental a través del análisis metodológico de las variables de salida.

#### 4.4.1.1 Selección del proceso

En general, los procesos de mecanizado siguen el modelo de corte oblicuo, aunque en la práctica es habitual considerar el modelo de corte ortogonal porque dispone de un análisis simplificado del mecanizado, ya que permite reducir en la mayoría de los casos la complejidad geométrica y describe la mecánica de las operaciones de corte con buena precisión. Por tal motivo, en esta investigación se ha considerado un caso real bajo diversas condiciones de corte, con aproximación cercana al corte ortogonal. Una primera etapa de este estudio conllevará el análisis de la viruta mediante el proceso de torneado convencional (por su sencillez de ejecución y baja complejidad geométrica).

Atendiendo a ello, se utilizó un torno convencional paralelo modelo Pinacho S-90/180, con visualizador digital de cotas modelo MANV-301T, de la marca Fagor (Figura 4.4), con potencia máxima de 3.4 kW, ubicado en el Taller Máquinas-Herramienta del Área de Conocimiento de Ingeniería de Procesos de Fabricación de la Universidad de Málaga.



**Figura 4.4** Maquinaria utilizada en los ensayos: Torno convencional Pinacho S-90/180.

#### 4.4.1.2 Parámetros tecnológicos de corte

Tal y como se ha puesto de manifiesto previamente, el número de variables que intervienen en los procesos de mecanizado es elevado, haciendo que su estudio sea complejo. En los capítulos anteriores se hizo referencia al grado de afectación de ciertos factores críticos que influyen en la formación de la viruta, del que los aspectos tecnológicos forman parte.

Con objeto de simplificar dicha investigación se procede a identificar los parámetros tecnológicos de estudio. Se puntualiza que el rango establecido para la realización de ensayos está respaldado por experiencias científicas previas, encontradas durante la revisión bibliográfica, relacionadas con el mecanizado de aleaciones ligeras, logrando implementar una serie de métodos comparables que permitirán interpolar ideas que posteriormente se observarán durante el desarrollo de esta tesis. Atendiendo a dichas experiencias, en la realización de los ensayos se emplearon los valores de velocidad de corte  $V_c$  y de avance  $f$ , recogidos en la Tabla 4.2, y que se corresponden con los diversos escenarios de trabajo, a fin de identificar el grado de influencia que tienen sobre la morfología de la viruta y sus características geométricas. Se trata de valores habitualmente utilizados en el mecanizado de este tipo de aleaciones en aplicaciones aeronáuticas. Para todos los ensayos se mantuvo constante la profundidad de corte,  $a_p$  de 1 mm.

**Tabla 4.2** Valores de  $V_c$ ,  $f$  y  $a_p$  utilizados en los ensayos.

$V_c$ [m/min]	30	45	65	80	100	125
$f$ [mm/r]	0,05	0,1	0,2	0,3		
$a_p$ [mm]	1					

#### 4.4.1.3 Condiciones del mecanizado

De acuerdo con todo lo anterior, en este trabajo se propone una estructura metodológica para la caracterización y análisis de la viruta mediante un proceso de mecanizado con ausencia de fluidos de corte (en seco), dado que en la actualidad



logra cumplir con la normativa medioambiental, minimizando el impacto ambiental. A su vez aporta ciertos beneficios, no sólo favorables para el medio ambiente, sino que es beneficioso también para el propio trabajador, brindando un ambiente de trabajo limpio y seguro, contribuyendo a la satisfacción del mismo y favoreciendo la economía del proceso [19, 20].

Por otro lado, la elección del material de estudio justifica lo factible que resulta trabajar con ausencia de fluidos de corte, de ahí el elevado número de estudios que consideran oportuna esta opción [21, 22].

#### 4.4.1.4 *Herramienta de trabajo*

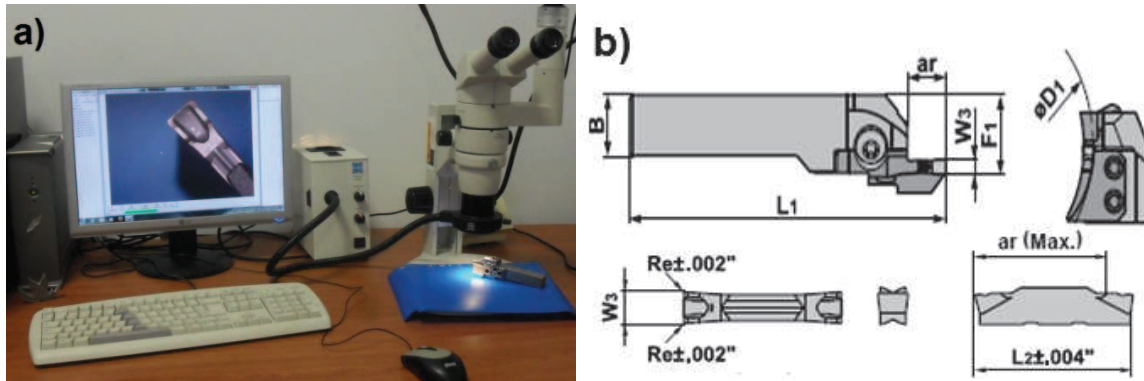
La geometría de corte es una de los principales variables de influencia en el proceso de mecanizado ya que determina el rendimiento de la producción y la calidad del producto. Una herramienta de corte es un elemento que permite remover material de una pieza mediante ciertos movimientos mecánicos realizados a elevadas velocidades, de manera que al entrar en contacto con la superficie a mecanizar desprende cierto material conocido como viruta, por consiguiente la elección de la herramienta debe estar relacionada con el material a mecanizar, precisando ser suficientemente resistentes al desgaste y a los cambios térmicos que se presentan durante el mecanizado (factor crítico en la economía del proceso), a la vez que deben poseer una geometría de corte adecuada al proceso y al diseño de la pieza a obtener.

Actualmente, existe una gran diversidad de herramientas de corte. Su clasificación está relacionada con las propiedades fisicoquímicas/geométricas, mientras que su diseño debe permitir resistir los cambios térmicos generados en el proceso. En el capítulo 2, se detalla de manera particular los tipos de herramientas de uso más frecuente en el mecanizado.

En este apartado se describe las herramientas seleccionadas para cada uno de los tipos de corte establecidos en esta tesis. Concretamente, se emplea el uso de dos herramientas de corte, una de ellas para la obtención preliminar de la pieza a mecanizar (permitiendo obtener una probeta con geometría tubular) y la otra para, posteriormente, para la ejecución de los ensayos sobre dicha pieza; es decir que permita lograr el corte ortogonal deseado.

En primera instancia se procede a describir la herramienta utilizada para la elaboración de cortes previos al ensayo, específicamente para el ranurado frontal. Por su diseño versátil e innovador, se seleccionó la herramienta de ranurado con un sistema *Trilock* de la marca comercial MITSUBISHI (Figura 4.5), que fue elegida principalmente por el tipo de geometría que puede brindar, ajustándose a las especificaciones de la probeta de estudio. El sistema modular de fijación que cuenta la herramienta de ranurado está dividida en 3 zonas, las cuales permiten absorber las vibraciones generadas durante el corte y, en conjunto, brindan máxima precisión y rigidez en el momento de ser utilizada. En la Tabla 4.3 se muestran sus especificaciones.

Por otro lado, la plaquita elegida para este corte es la GY2M0300F020N con recubrimiento VP20RT, utilizada habitualmente en operaciones de mecanizado y particularmente para aleaciones resistentes al calor, como sucede en este caso con las aleaciones con base titanio.



**Figura 4.5** Herramienta de ranurado frontal. a) Vista general, b) Características geométricas.

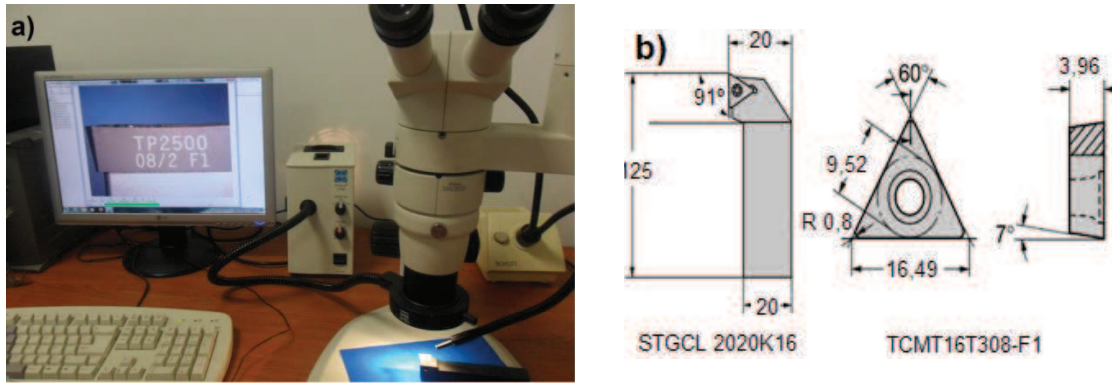
**Tabla 4.3** Características de la herramienta de ranurado frontal.

Portaherramienta de ranurado		Cabezal de corte		Plaquita	
Modelo <b>GYHL2020K00M25L</b>		Modelo <b>GYM25LD-F20</b>		Modelo <b>GY2M0300F020N</b>	
$\phi_{max}$ [ mm ]	100	$\phi_{max}$ [ mm ]	100	Re [ mm ]	0,2
$\phi_{min}$ [ mm ]	75	$\phi_{min}$ [ mm ]	75	$a_r$ [ mm ]	19,2
$L_1$ [ mm ]	131	$a_p$ [ mm ]	20	$L_2$ [ mm ]	20,7
$L_2$ [ mm ]	45	$L_1$ [ mm ]	131	$W_3$ [ mm ]	3
H x B [ mm ]	20 x20	$L_2$ [ mm ]	45	$\alpha_n$	N
$F_1$ [ mm ]	26	$H_1 \times H_2$ [ mm ]	20X20	Asiento / Filo	F / 2
$H_2$ [ mm ]	20	$W_3$ [ mm ]	3 a 3,18	Grado	VP20RT / MS

En la Tabla 4.4 describe la geometría de plaquita seleccionada para realizar los ensayos de corte ortogonal, en este caso con la plaquita triangular TCMT16T308F1, de Carburo de Wolframio (WC-Co) con recubrimiento TP2500 (TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de la marca comercial SECO, tal como se observa en Figura 4.6, por sus características cercanas al corte deseado.

Es importante indicar, que la herramienta de corte seleccionada, ha sido referenciada en diversas líneas de investigación; tales como la Universidad de Mondragón [23]. No obstante, dicho estudio se ha centralizado en determinar la vida útil de la herramienta y en conocer el grado de maquinabilidad de ciertas aleaciones de titanio.

Por lo tanto, el objetivo de los ensayos experimental de esta investigación es evaluar el mecanismo de formación de la viruta en relación a posibles alteraciones geométricas de la herramienta de trabajo, a través de un estudio microgeométricos de ambas.



**Figura 4.6** Herramienta para corte ortogonal. a) Vista general, b) Características geométricas mediante codificación ISO.

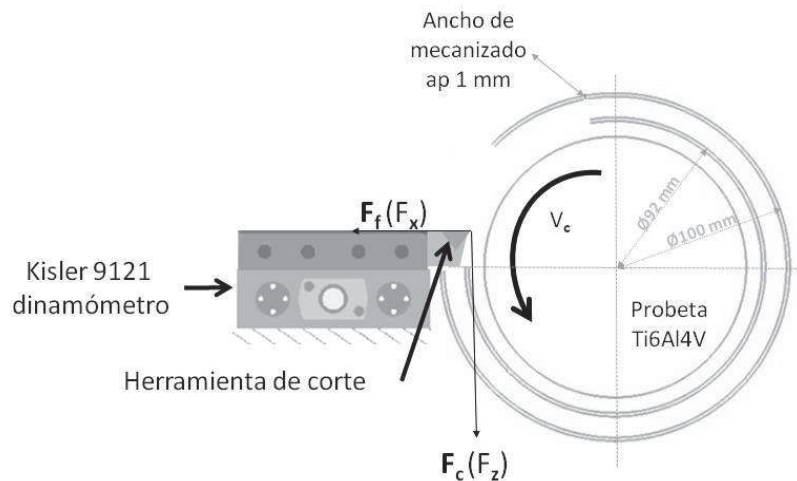
**Tabla 4.4** Características de la herramienta para los ensayos.

Portaherramienta		Plaquita	
Modelo		Modelo	
STGCL 2020K16		TCMT16T308-F1	
$W_F$ [ mm ]	25	$Re$ [ mm ]	0,8
$HxB$ [ mm ]	20x20	$IC$ [ mm ]	9,52
$L_F$ [ mm ]	125	$L$ [ mm ]	16,49
$K_r$	91	$\alpha_n, \alpha_f$ [°]	7°
OHN	20.4	$S$ [ mm ]	3,968
$\alpha$	0	Recubrimiento	TP2500

#### 4.4.2 Tipo de ensayo

Las razones anteriormente tratadas identifican las ventajas que conlleva el adaptar la geometría de corte a un modelo ortogonal o cercano a ello. Para llevar a cabo esta investigación se optó por diseñar una probeta que permita aproximarse al proceso de corte esperado.

Tal y como se describe en el capítulo 2, el corte ortogonal se origina durante los primeros instantes de giro de la pieza en contacto con la herramienta de corte, cuyo filo se encuentra situado de forma perpendicular a la dirección de la velocidad de corte, tal como se muestra en la Figura 4.7.



**Figura 4.7** Diseño experimental con corte ortogonal.



En referencia al diseño expuesto, se puede observar que, para realizar el corte ortogonal, la pieza probeta tiene una geometría tubular conformada por dos arcos correspondientes a dos diámetros, obtenidos mediante el mecanizado previo de los canales existentes entre ellos.

Dichas ranuras permitirán materializar distintas situaciones de corte. De acuerdo con el diseño experimental, la captura de las variaciones dinámicas de la fuerza de corte durante el mecanizado se realiza mediante un transductor piezoeléctrico de la marca Kistler modelo 9121, habilitado a dos componentes situados en el portaherramienta, tal como se aprecia en la figura ya referida.

Es importante indicar que bajo este diseño se estará trabajando con fuerzas de corte transitorias, lo que permitirá determinar el desgaste prematuro de la herramienta durante el primer giro de corte.

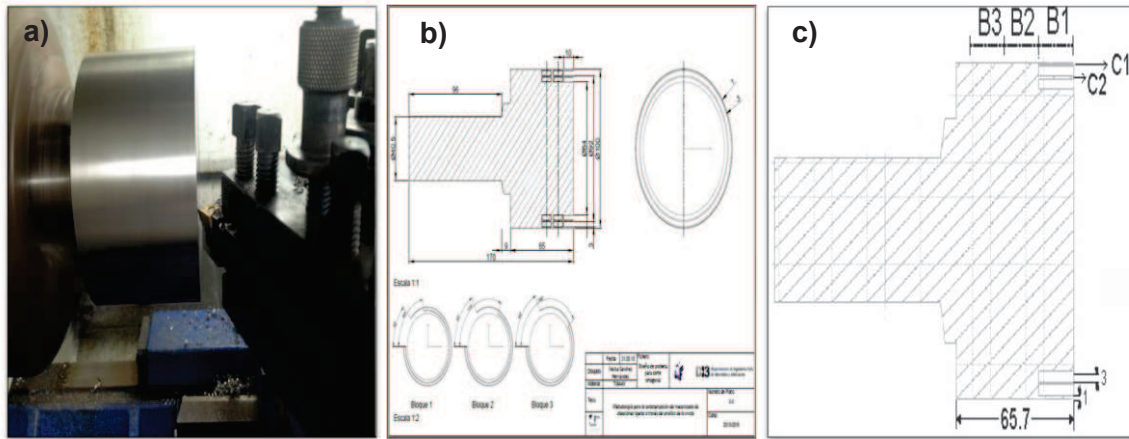
De acuerdo con lo anterior, se define una serie de objetivos particulares para este tipo de ensayo:

- Diseñar un método de trabajo que permita capturar las señales de fuerza de una manera práctica y fiable.
- Analizar el desgaste prematuro que sufre la herramienta en el primer instante del mecanizado, así como el grado de influencia de los parámetros tecnológicos empleados en dicho corte.
- Analizar y clasificar la morfología de la viruta obtenida durante el proceso de mecanizado en función de los parámetros de corte empleados.
- Establecer ecuaciones paramétricas que permitan predecir el comportamiento de la aleación *Ti6Al4V* en función de los distintos escenarios de corte.
- Realizar un análisis de la relación existente entre la fuerza de corte obtenida, el desgaste de la herramienta y la morfología de la viruta, en función de los parámetros de corte empleados.

#### 4.4.3 Preparación del material

Se parte de una barra cilíndrica con dimensiones comerciales que posteriormente será transformada a una geometría que permita generar la mecánica de corte ortogonal (equivalente a una operación de limado). La pieza así mecanizada será nombrada como preforma (material de trabajo para realizar ensayos). Este paso se encuentra documentado en los anexos de esta memoria de Tesis; Anexo II (Diseño de probeta), Anexo III (Procedimiento empleado para la captura de señales), Anexo IV (Equipamiento utilizado para la adquisición de datos) y Anexo V (Protocolo de ensayos).

Sobre las bases de las ideas expuesta, se establece la preparación de la probeta distribuida en 3 secciones (tal como se muestra en la Figura 4.8), donde posteriormente se detalla de forma individual.



**Figura 4.8** a) Suministro y adaptación, b) Diseño y c) Codificación de probeta.

#### 4.4.3.1 Suministro y adaptación del material de trabajo

Para este estudio, se suministro una barra de la aleación *Ti6Al4V* con geometría estándar de 170 mm de longitud y 105 mm de diámetro, por lo que fue necesario realizar diversas operaciones previas a los ensayos experimentales.

Como primer paso, se realizó el corte de una muestra (no mayor de 5 mm) para la evaluación de su composición química y microestructura (tal como se indicó en el punto 4.2). Dicho mecanizado se realizó mediante una sierra de corte de cinta semiautomática de la marca, Belflex modelo BF 350 DSTF, con potencia de 1.5 - 2 kW.

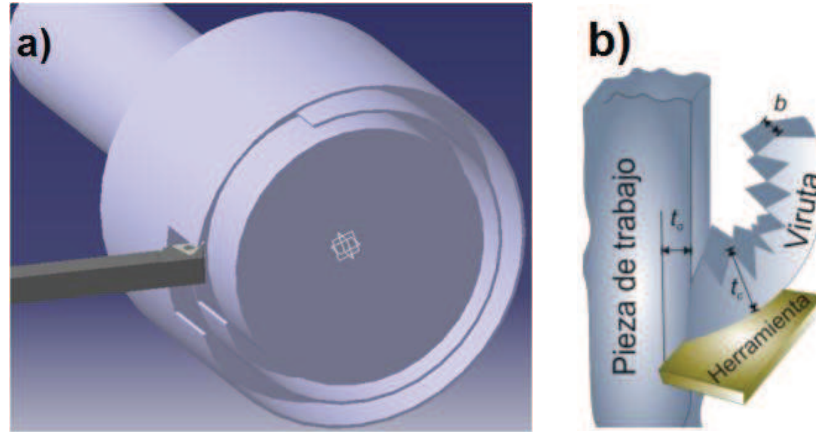
Posteriormente, cada extremo de la barra fue sometido a un refrentado de 1 mm, a fin de homogenizar las superficies de trabajo. A una de sus caras se le practicó un rebaje considerable, con el propósito de facilitar su sujeción durante su mecanizado. Así mismo, es conveniente realizar un avellanado en la cara opuesta al agarre, para el alojamiento del contrapunto. Finalmente, para garantizar una uniformidad en la superficie de trabajo, fue necesario desbastar la probeta hasta alcanzar un valor de 100 mm de diámetro, Figura 4.8 a). Las operaciones de corte, omitiendo el corte inicial, fueron realizadas en un torno convencional paralelo, mencionado con anterioridad en el punto 4.4.1.1.

#### 4.4.3.2 Diseño de la preforma

Una vez finalizados los cortes previos, se procede a describir las dimensiones de la preforma, las cuales están determinadas por las especificaciones geométricas del utillaje de la maquinaria empleada y, sobre todo, del corte ortogonal esperado, Figura 4.8 b). Como complemento se adjunta el plano de la preforma en el Anexo II (Diseño de probeta).

El diseño de la preforma se caracteriza por una geometría peculiar, en forma tubular, que permite simular la mecánica de corte ortogonal, tal y como se observa en la Figura

4.9, con el propósito de justificar la geometría propuesta. Para su diseño se partió de un conjunto de experiencias de otros estudios aplicados a diferentes objetivos, pero con un fin en común: recrear una geometría de corte equivalente al proceso de limado (corte ortogonal).



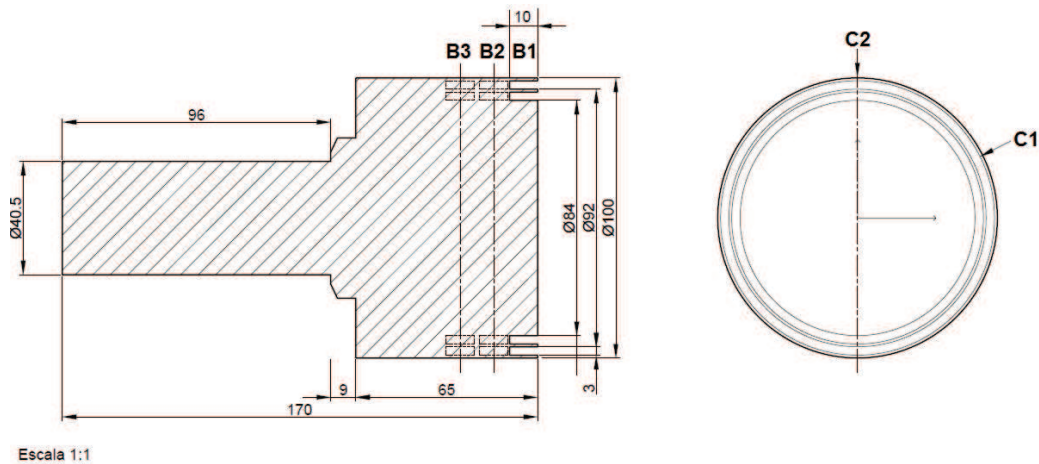
**Figura 4.9** Geometría de corte, a) Aproximación del corte en el torno y b) corte ortogonal.

Uno de los estudios relacionados con la geometría propuesta fue desarrollado en la Universidad de Toulon por el investigador A. Daymi [24]; sus estudios están enfocados a conocer los efectos de la velocidad de corte en la morfología de la viruta y las fuerzas de corte, para el mecanizado de aleación *Ti6Al4V*, simulando un corte ortogonal mediante el diseño de barras de dicha aleación con forma tubular, estando a su vez inspirado en libro *Material & Processes in Manufacturing* [25].

Otra investigación cercana a la idea de esta tesis fue propuesta por A. Hamid [26] en 1995, y se corresponde con el mecanizado de una de las caras frontales de una sección tubular de cierta aleación de aluminio, siendo su objetivo conocer las fuerzas de corte transitorias bajo diversos parámetros de tecnológicos. Todos estos estudios, incluyendo los correspondientes a esta tesis, están relacionados con la propuesta realizada por S. Miyazawa en 1985 [27], cuyo propósito inicial fue medir las fuerzas transitorias en el mecanizado mediante el análisis de Fourier, empleando una geometría de corte ortogonal. Para ello propuso diversos diseños basados en las operaciones más comunes del mecanizado, como el fresado y torneado.

Tras una serie de reflexiones, se planteó crear una probeta adaptable a las dimensiones iniciales del material a estudiar, en función de la geometría de corte esperada, permitiendo representar varios aspectos tecnológicos.

Para ello se realizaron una serie de cortes en la geometría original del material, visualizadas en Figura 4.10, optimizando los recursos del material de la probeta. Se observa, en una de sus vistas, un conjunto de ranuras que serán la clave del corte, mientras que en la otra se aprecia la geometría que facilita la sujeción en el plato de garras.



**Figura 4.10** Diseño de probeta de ensayo.

En la primera vista, se logra identificar una serie de secciones secuenciales perpendiculares a su longitud (en este caso 3 secciones), cada una de las cuales representa un bloque de trabajo (B1, B2 y B3) a una distancia de 10 mm; equivalente a la magnitud total del corte correspondiente a un determinado rango de  $V_c$  bajo ciertos valores de  $f$ . El bloque de trabajo; equivalente a 80 ensayos, se encuentra formado por dos ranuras frontales (C1 y C2) ubicadas a distintos diámetros. A estas dos ranuras se las denotará como corona C1, correspondiente a la de diámetro 100 mm, y corona C2, de diámetro 92 mm. Ambas coronas están realizadas con un espesor conocido, correspondiente a la profundidad de corte  $ap$  de 1 mm, con la intención de establecer el ancho de la viruta en la posterior etapa de mecanizado. Las coronas serán cortadas bajo diversas condiciones de corte, correspondientes a los valores con los que se realizará la caracterización del mecanizado para las aleaciones de *Ti6Al4V*, en base a los datos aportados por investigaciones ya referenciadas en esta tesis.

Para finalizar el diseño, se establece una última operación de mecanizado, a fin de obtener una zona de desahogo, eliminando un sector de las coronas, a fin de garantizar que la velocidad de giro del husillo haya alcanzado un régimen permanente, dado que, al arrancar el movimiento de la máquina, la pieza partirá de una velocidad cero, sufriendo posteriormente una aceleración hasta alcanzar el valor de velocidad de giro elegido. De esta manera, la herramienta se situará en el inicio del sector libre, asegurando que se inicia el mecanizado del material de la corona cuando se haya alcanzado la velocidad de giro constante y, por tanto, la velocidad de corte igualmente uniforme, al mantenerse invariable el radio.

Como se indicó en el capítulo 2, la velocidad de corte es una variable crítica en el mecanizado y por ello es imprescindible garantizar la velocidad de giro constante durante la ejecución de los ensayos.

Hoy en día, los procesos de corte disponen de una alternativa práctica que permite controlar los aspectos geométricos del mecanizado, mediante el uso de maquinaria con sistema de automatización integrado, conocido como control numérico (CN), el cual permite adaptar en cada momento la velocidad de giro a la velocidad de corte

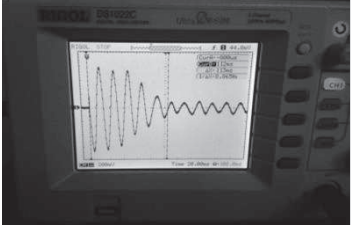
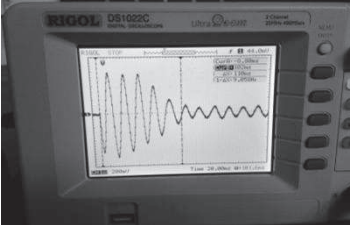
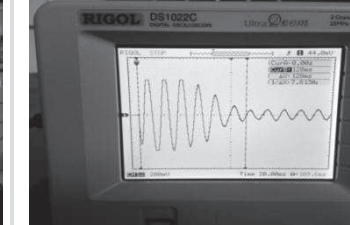
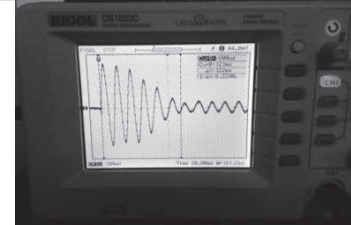
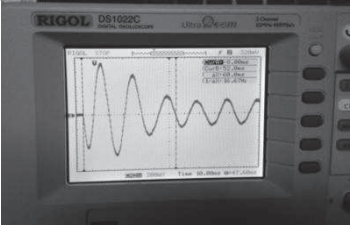
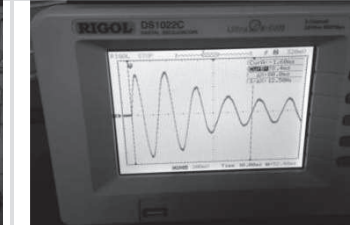
más conveniente, según las condiciones de corte. Sin embargo no en todos los casos esta propuesta es aplicable, como sucede con el torno convencional empleado.

Con este fin, se procede a identificar el comportamiento dinámico del motor del torno durante su arranque, hasta lograr la velocidad de giro constante, correspondiente a la velocidad de corte seleccionada para cada ensayo.

En otras palabras, para realizar esta operación, se mide e identifica el periodo de aceleración que obliga a girar el motor a una velocidad cada vez más elevada, obteniendo el régimen permanente establecido, el cual está determinado por el intervalo de tiempo que transcurre de uno a otro, es decir, cuando las variaciones terminan por amortiguarse, quedando al final dichas magnitudes en régimen permanente. A este intervalo se le denomina tiempo de desahogo,  $t_d$ , correspondiéndose con un régimen transitorio. Para realizar dicha medición se empleó un osciloscopio digital de la marca RIGOL, modelo DS 1022C.

Finalmente se procede a la captura de datos correspondientes al parámetro establecido para cada ensayo (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Valores de  $t_d$  en función a la velocidad de giro establecida para cada ensayo.

$n$ [r/min]	$V_c$ [m/min]	$t_d$ [s]	$n$ [r/min]	$V_c$ [m/min]	$t_d$ [s]	$n$ [r/min]	$V_c$ [m/min]	$t_d$ [s]
92	25-30	113	220	60	110	360	100	128
								
$n$ [r/min]	$V_c$ [m/min]	$t_d$ [s]	$n$ [r/min]	$V_c$ [m/min]	$t_d$ [s]	$n$ [r/min]	$V_c$ [m/min]	$t_d$ [s]
140	45	122	265	80	60	430	125	80
								

En esta tabla se pueden apreciar seis posibles escenarios de corte, distribuidos según las velocidades del husillo  $n$ , correspondientes a las diferentes velocidades de corte  $V_c$  establecidas para cada ensayo, e igualmente el tiempo de desahogo  $t_d$  que tarda en amortiguarse el torno según los parametros anteriores.

Dicho intervalo se produce en un breve espacio de tiempo, variando en milésimas de segundos, dando lugar a unos fenómenos transitorios que posteriormente se amortiguan hasta lograr el estado estacionario.



Este valor de  $t_d$  será de gran ayuda debido a que permite calcular el valor angular  $\varphi_w$ , que se corresponde con el cambio de régimen de la velocidad de giro, que pasa de una fase transitoria a estacionaria, dando como resultado la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6** Cálculos para el diseño del desahogo.

$V_c$ [m/min]	$R$ [m]	$W$ [rad/s]	$t_d$ [s]	$\varphi_w$ [°]	$\varphi_w$ [°]
30	0,05	9,63	0,113	0,78	45
65	0,046	23,03	0,11	1,39	80
80	0,05	27,75	0,06	1,04	60
125	0,046	45,02	0,08	2,07	115
45	0,05	14,66	0,122	1,13	65
100	0,046	37,69	0,128	2,61	150

Para ello se procede a convertir la velocidad tangencial en angular, representada por la letra  $W$ . No obstante este parámetro tendrá un valor nulo al inicio de su arranque  $W_i$  (aplicable al rango de velocidades de giro empleadas) hasta lograr un régimen estable bajo un intervalo de tiempo.

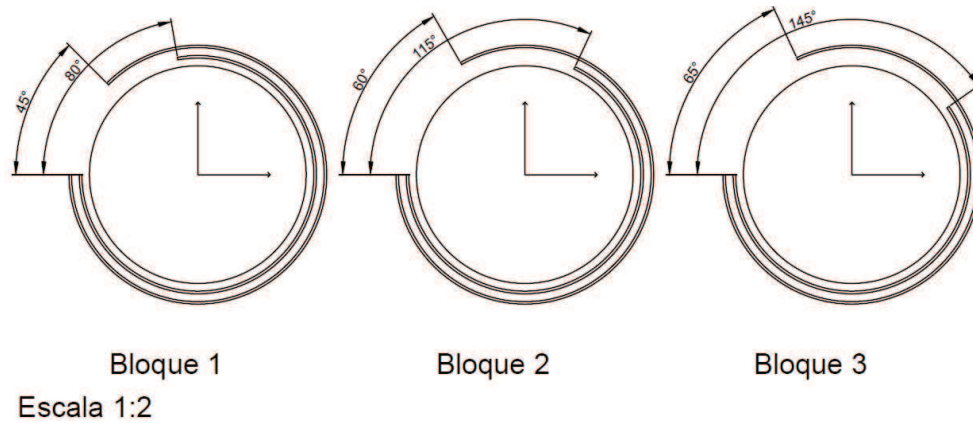
Posteriormente, será necesario aplicar la relación cinemática del movimiento circular uniforme que permitirá identificar la posición angular  $\varphi_w$ , correspondiente al intervalo de tiempo  $t_d$ , con el objetivo de garantizar una  $V_c$  constante para ejecutar el corte, mediante las siguientes ecuaciones:

$$W_f = n \frac{r}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{rad}}{1 \text{ r}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \quad (4.1)$$

Gracias a este valor es posible conocer la posición angular mínima, expresada en radianes, requerida para realizar el desahogo, dando como resultado, la siguiente geometría expuesta en la Figura 4.11.

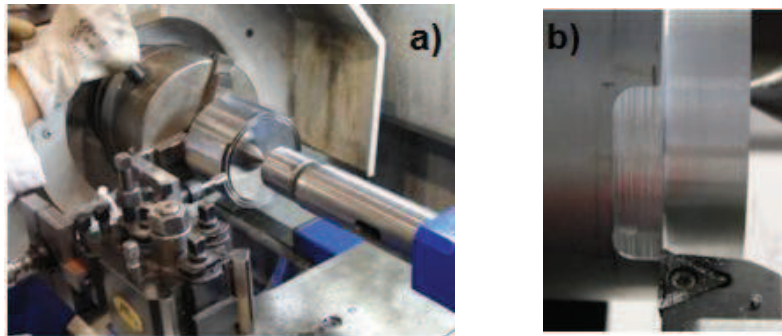
$$\varphi_w = t_d \frac{(W_f - W_i)}{2} \quad (4.2)$$

De acuerdo con la geometría asignada para cada bloque, es posible caracterizar distintos escenario de corte mediante una sección hueca, correspondiente a la corona de trabajo, que dependerá del desplazamiento angular  $\varphi_w$  calculado según el ensayo deseado. Se consideró un rango de 5 a 10° sobre cálculo inicial, con la intención de amortiguar el efecto de posibles variables externas que afectasen al diseño, Figura 4.11. Esta sección se encuentra respaldada por el Anexo VI (Hoja de cálculo de los parámetros de entrada).



**Figura 4.11** Geometría del desahogo para cada bloque de trabajo.

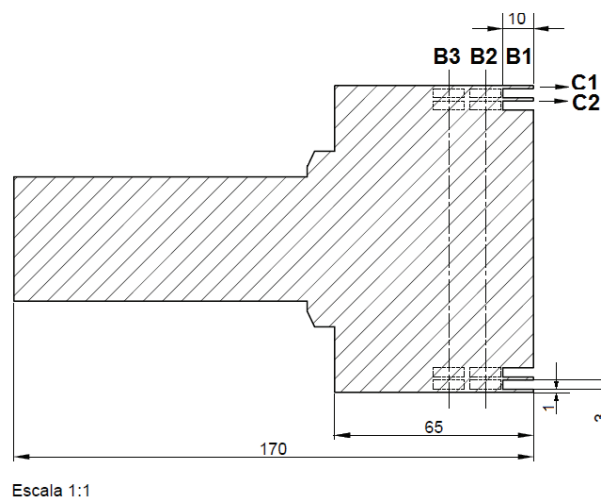
Una vez determinado la longitud de arco ó desahogo, se procede a realizar dicho corte. Para ello es necesario el uso de una amoladora manual de la marca Bosch, con una fresa de  $\varnothing 8$  mm, logrando obtener la geometría calculada (Figura 4.12).



**Figura 4.12** a) Fresado manual para el desahogo, b) Corte deseado para ensayo ortogonal.

#### 4.4.3.3 Codificación de preforma

Sobre las bases de las ideas expuestas, es necesario correlacionar el diseño de la preforma con los correspondientes bloques de trabajos  $B_n$ , que estarán representados por sus respectivos escenarios de corte  $C_n$ , tal como se muestra en Figura 4.13.



**Figura 4.13** Codificación de ensayos.

En el diseño expuesto, se identifican tanto los bloques como las coronas de trabajo (previamente mencionados en párrafos anteriores); dichos cortes corresponden con la combinación de los parámetros tecnológicos de estudio, en este caso  $V_c$  y  $f$  asignados según la geometría correspondiente a la preforma, que adoptarán los valores identificados en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7** Codificación de ensayos.

$B_n$	$C_n$	$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/r]				$ap$ [mm]
1	1	30	0,05	0,1	0,2	0,3	1
	2	65					
2	1	80					
	2	125					
3	1	45					
	2	100					

#### 4.4.4 Diseño y ejecución del programa para adquisición de fuerzas de corte

Esta sección expone un procedimiento que integra el diseño y ejecución de un programa informático (interface) que permite extraer datos, de forma instantánea, mediante señales eléctricas para la caracterización de las fuerzas de corte.

Con dicho procedimiento se tiene la intención de generar un protocolo que pueda servir en el futuro como guía práctica de futuros investigadores, de acuerdo con el contenido del Anexo III (Procedimiento para captura de señales) y la Figura 4.14.

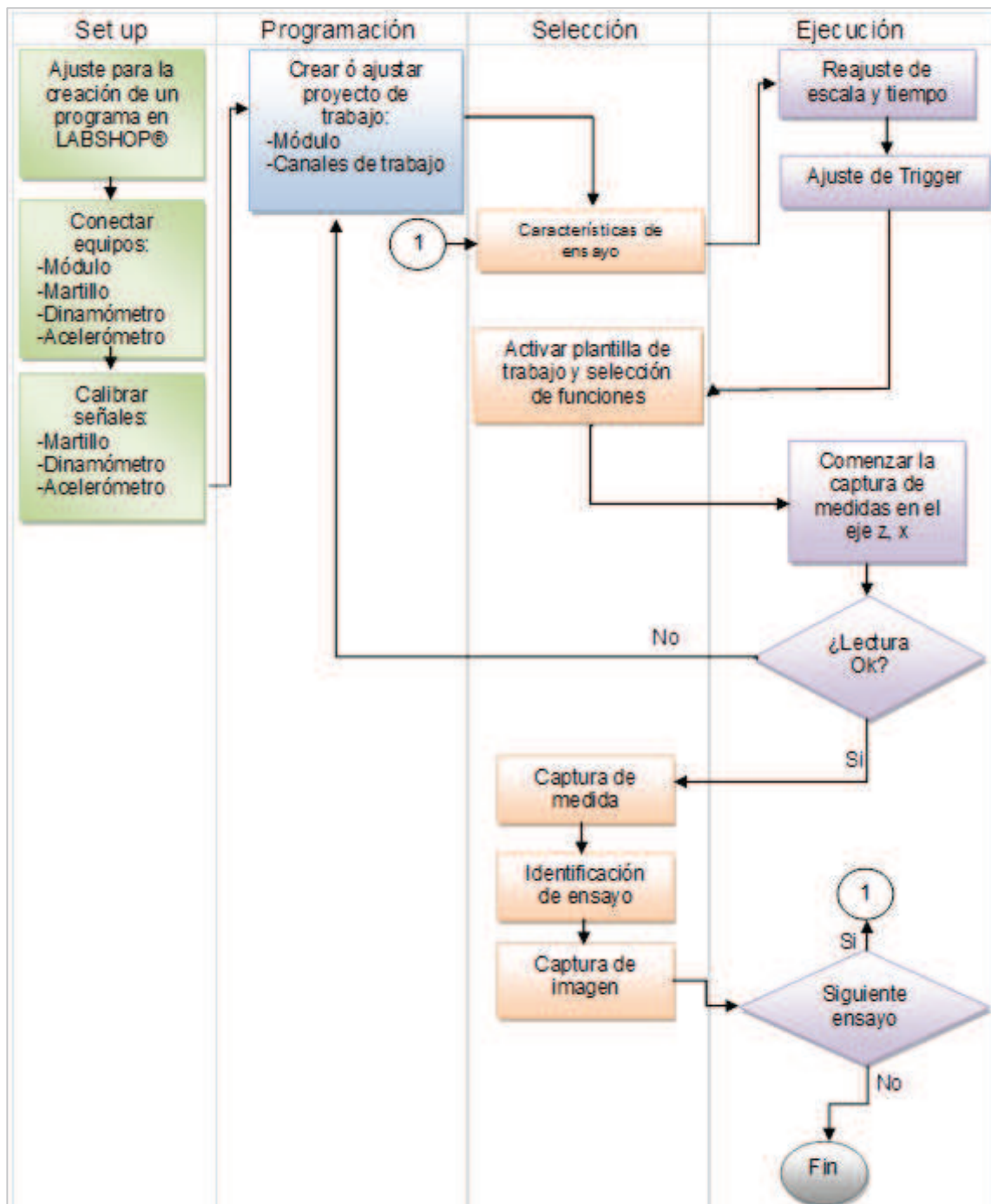
Tal como se indicó a lo largo de este capítulo, uno de los objetivos principales de esta tesis es determinar alternativas prácticas que logren realizar operaciones de corte concretas optimizando al máximo tanto los recursos materiales como técnicos.

Para ello, el equipamiento utilizado para la adquisición de datos tiene como finalidad la determinación de las fuerzas de corte durante el mecanizado de aleaciones ligeras.

El procedimiento propuesto permitirá un fácil manejo en la adquisición de señales eléctricas emitidas mediante el uso de un dispositivo piezoeléctrico (donde se detalla tanto el propósito del ensayo como el uso y puesta a punto para la captura de señales), permitiendo adquirir de forma experimental los valores de las fuerzas generadas durante al contacto de la herramienta con la zona de corte.

Dicho resultado permitirá conocer e identificar el comportamiento que sufre el material. De ahí la importancia de obtener lineabilidad, confiabilidad y estabilidad en las mediciones obtenidas mediante el uso de equipamientos adecuados (Anexo IV).

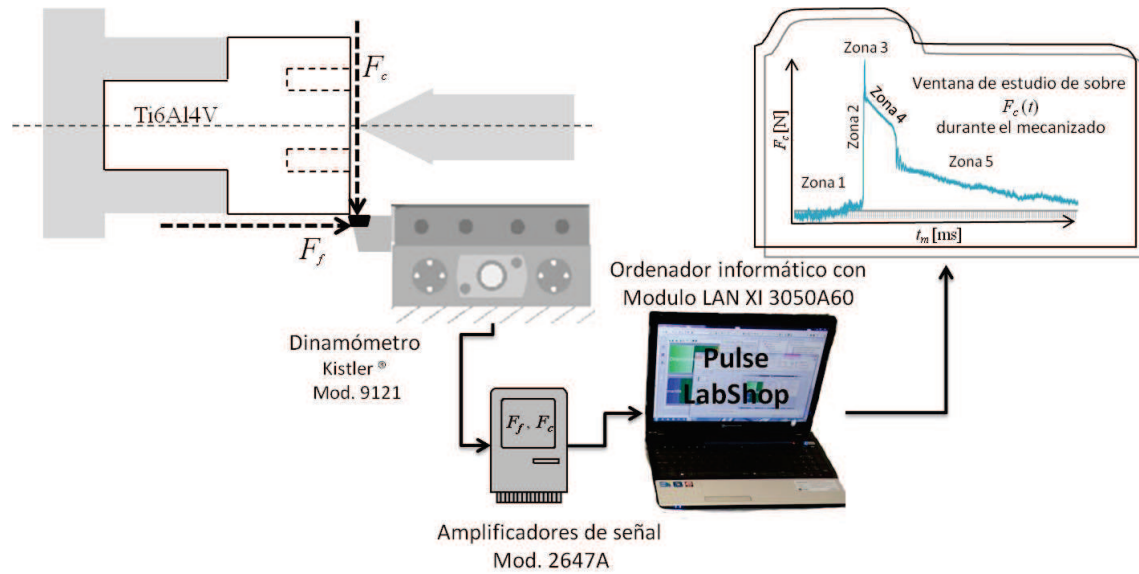




**Figura 4.14** Diagrama de flujo para la captura de datos.

No obstante, se comparte en la Figura 4.15 de forma específica, el esquema de trabajo establecido para obtener el valor de las fuerzas de estudio.

Otra tarea prioritaria en este apartado es obtener e interpretar los resultados en base a la geometría de corte (corte ortogonal), permitiendo identificar las fuerzas que interactúan durante el mecanizado.



**Figura 4.15** Esquema de trabajo para adquisición de fuerzas.

Por ello, se precisan identificar los ejes de trabajo, tal como se muestra en el esquema anterior (en este caso el dinamómetro para la adquisición de fuerzas está habilitado para medir en los ejes X, Z).

Identificando los ejes de trabajo, se observa que a la fuerza radial al corte no se verá afectada. Por consiguiente, este estudio se centra en evaluar a la fuerza de corte  $F_c$ , ubicada de forma tangencial al eje de corte. Por último, la fuerza de avance  $F_f$  ubicada de forma axial y paralela a  $f$ .

Ambas fuerzas resultantes han sido adquiridas bajo diversos valores de  $f$  en relación con  $V_c$ . Sin embargo, el diseño del corte requiere que  $f$  sea fijo, es decir, que la fuerza para vencer la resistencia del material dependerá del impacto inicial durante un ciclo o revolución del corte. Se puntualiza que el objetivo de analizar la  $F_c$  es conocer el esfuerzo requerido para realizar el corte, así como también los posibles efectos en la herramienta de corte durante el primer ciclo del mecanizado.

Por su parte, la evaluación de los valores de  $F_f$  permite conocer el comportamiento inicial de la fuerza de rozamiento de la herramienta con respecto a la pieza de trabajo y la relación con el mecanismo de formación de viruta. Con este fin, se calculó su valor según la teoría de Merchant [28].

Para el desarrollo de esta sección se emplearon referencias bibliográficas relacionadas con la determinación y análisis de la dinámica de corte, con gran influencia a la metodología planteada en esta tesis, entre las que destaca [29, 30], por determinar un modelo matemático que proporciona coeficientes de corte dinámico, partiendo del estado transitorio, mediante la experimentación basada en el corte ortogonal y relacionada con la variación del ángulo de corte.

Otra investigación relacionada con las fuerzas transitorias está relacionada con la referencia [27], donde se propone un método que permite medir las fuerzas por medio de una transformada de Fourier y en la que se destaca la importancia por conocer los métodos apropiados al proceso para la captura de señales y las posibles variables susceptibles de modificar la lectura emitida por el equipo; tal es el caso de la masa de

la pieza de trabajo en relación con la herramienta de corte, la correcta determinación del punto de lectura de fuerza o el rango de frecuencia de los equipos, por mencionar los más evidentes y cuyas observaciones son consideradas en esta tesis.

Otro punto de interés es el conocer la relación dinámica de las fuerzas durante el estado transitorio del corte de metales. Con referencia a este tema, se consideran las aportaciones del estudio [26], en el que se analizan los efectos sobre las fuerzas durante el corte interrumpido de tubos de aluminio de la serie 2000, logrando capturar dichas fuerzas en los primeros instantes del corte mediante el uso de un traductor de fuerza similar al utilizado en esta tesis. Dicha investigación propone un modelo paramétrico relacionado con la velocidad de giro, espesor de la viruta y su avance, la cual será de gran ayuda para orientar y verificar los datos adquiridos de esta tesis.

Para finalizar esta sección, se pretende determinar, de manera teórica, los parámetros tecnológicos de entrada, lo que permitiría validar los resultados obtenidos en cada uno de los bloques estudiados.

Para ello, se tendrán en cuenta los primeros cálculos establecidos en el punto 4.4, con el objetivo de complementar las operaciones restantes que determinan los parámetros de entrada. Previamente se han identificado los parámetros de corte relacionados con el valor de la velocidad de giro de la torreta del torno, seleccionada para cada ensayo, en este caso la velocidad de corte,  $V_c$  y la velocidad angular,  $W$ , determinándose así los valores de  $t_d$  y  $\varphi_w$ . En el Anexo VI (Hoja de cálculo de los parámetros de entrada) se complementa información adicional.

Mediante la ecuación 4.3 se determina el rango en el que pueden variar los ensayos durante el mecanizado, identificado con las siglas  $t_m$ , correspondiente al tiempo requerido para realizar el corte.

$$\begin{aligned} d\varphi &= W dt \\ \int_{t_d}^{t_m} W dt &= \int_{\varphi_w}^{\varphi_f} d\varphi \\ W (t_f - t_d) &= \varphi_f - \varphi_d \\ t_m &= \frac{\varphi_f - \varphi_d}{W} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Otros parámetros de gran importancia orientativa son tanto la frecuencia  $N$  como el periodo  $T$  que se tarda al mecanizar en una vuelta de corte, de ahí las siguientes ecuaciones:

$$T = \frac{1}{n} \quad (4.4)$$

$$N = \frac{1}{T} \quad (4.5)$$

Los valores correspondientes a cada variable se visualiza en la Tabla 4.8, que servirá de base para realizar los ensayos.

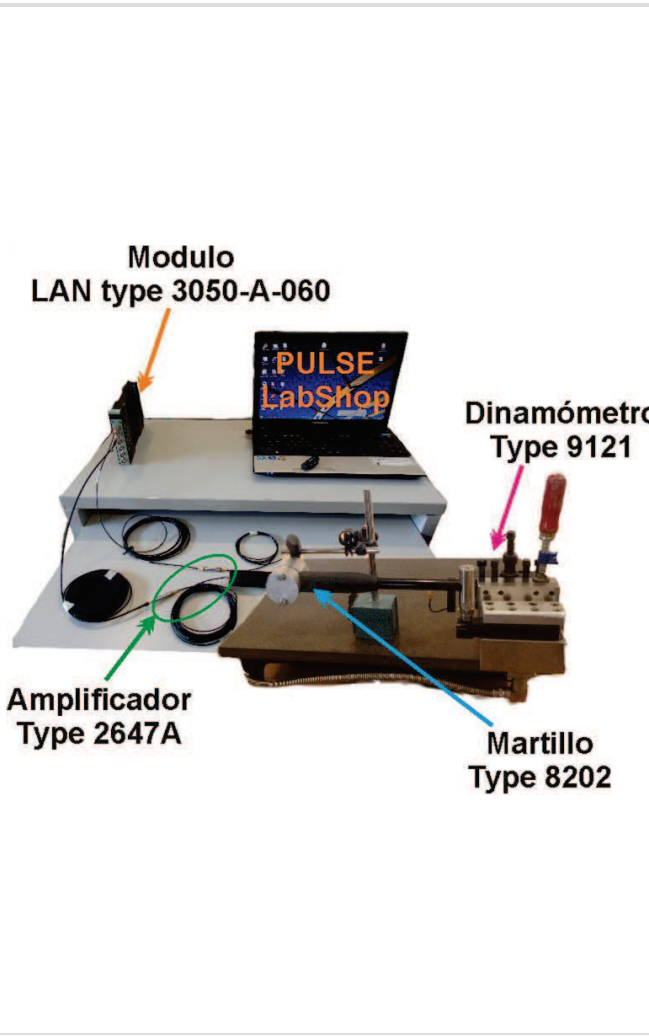
Tabla 4.8 Cálculo de parámetros de entrada.

$n$ [ $\frac{r}{min}$ ]	$\varnothing$ [mm]	$t_d$ [s]	$V_c$ [ $\frac{m}{min}$ ]	$W$ [ $\frac{rad}{s}$ ]	$\varphi_w$ [rad]	$N$ [Hz]	$T$ [s]	$t_m$ [s]
92	100	0,113	28,90	9,63	31° ∴ ajusta a 45° ≈ 0,78 rad	1,53	0,653	0,571
220	92	0,110	63,58	23,03	72,5° ∴ ajusta a 80° ≈ 1,39 rad	3,67	0,272	0,212
265	100	0,06	83,25	27,75	47,5° ∴ ajusta a 60° ≈ 1,04 rad	4,42	0,226	0,188
430	92	0,08	124	45,02	103° ∴ ajusta a 115° ≈ 2,07 rad	7,18	0,139	0,093
140	100	0,122	44	14,66	51° ∴ ajusta a 65° ≈ 1,13 rad	2,33	0,428	0,351
360	92	0,128	104	37,69	138° ∴ ajusta a 145° ≈ 2,61 rad	5,99	0,166	0,097

Para concluir, en la Tabla 4.9 se muestran las características del equipamiento empleado para la adquisición de datos, al que fue necesario realizar algunas adaptaciones para lograr la adquisición de señales.

Así, en el caso del transductor piezoeléctrico correspondiente al dinamómetro, se incorporó una estructura adicional para su ajuste a las dimensiones de la torreta del torno. Así mismo, para realizar la verificación de señales fue necesario utilizar equipos adicionales.

Tabla 4.9 Características del equipo empleado para adquisición de datos.

	<b>Analizador de datos</b>	
	Módulo	Sistema Analizador tipo 3050-A-060
	Hardware	PULSE Labshop software
	Señales Dyn-X technology	6 canales LAN-XI 51.2 kHz (Mic,CCLD, V)
		160 dB rango de salida
	Adaptaciones	DeltaTron, ICP® e IEPE
	Amplificador de carga	Tipo 2647-A, convertidor a CCLD
	Amplitud	1 (mV/pC)
	Frecuencia de trabajo	0,17 Hz a 50 kHz
	Cables	Conexión de BNC
	<b>Dinamómetro</b>	
	Dinamómetro	Modelo 9121 de 3 componentes x, y, z
	Serie	544137
	Sensibilidad	F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub> -7,9 pC/N, F <sub>z</sub> - 3,8 pC/N
	Frecuencia	1000 Hz
	Rango de Fuerza	F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub> -3 a 3 kN, F <sub>z</sub> - 6 a 6 kN
	Portaherramienta	Tipo 9153A
	Adaptador de torreta	Modificada (Ver Anexo III)
	Conexión y Cables	1688B5 y 1689B5

Continuación de la Tabla 4.9



Equipamiento adicional	
Martillo de Impacto	Modelo 8202 serie 1658378
Sensibilidad	4 pC/N
Serie	1658378/1653254
Acelerómetro	Modelo 4508 B
Sensibilidad	9,967 mV/ms <sup>-2</sup>
Serie	31079
Calibrador	Vibraciones tipo 4294
Sensibilidad	10 ms <sup>-2</sup>
Serie	2056545
Conexión y Cables	AO0526D050 / Adaptador BNC2900251

#### 4.5 Ejecución de ensayos experimentales

Una vez seleccionadas las variables de entrada del proceso, se procede a la ejecución de los ensayos de mecanizado. El fundamento de esta tesis se basa en la realización de ensayos experimentales con la intención de comprender el comportamiento del proceso de mecanizado mediante la operación de torneado.

Por lo tanto, para llevar a cabo los ensayos es necesario establecer una línea de trabajo que permita determinar los efectos de las variables independientes (ya mencionadas con anterioridad) que interactúan en el proceso. Será preciso definir los medios necesarios para la obtención de datos empíricos que permitan caracterizar el comportamiento del material mediante la selección, análisis y medición de los fragmentos de viruta obtenidos en cada ensayo, así como la herramienta de corte y la captura de fuerzas.

En consecuencia, se establecerá el protocolo a seguir para la realización de los respectivos ensayos. Las actividades correspondientes a dicho procedimiento forman parte de la metodología propuesta a lo largo de este capítulo. Para llevarla a cabo, es necesario adaptar el procedimiento establecido dentro del grupo de investigación TEP933, referente a la codificación específica que identifica cada ensayo, y así unificar criterios para la trazabilidad y manipulación de los datos obtenidos durante la experimentación.

##### 4.5.1 Codificación de ensayos

Este procedimiento se inicia con la recepción de la caja de plaquitas, cuyo contenido comercial es de 10 unidades por caja. Se numera el espacio de cada plaquita (1 al 10) y a su vez se identifica cada plaquita con el número correspondiente al espacio asignado; se coloca una etiqueta en la cara interna de la caja con la información sobre los ensayos en las que se empleará el contenido de ella y, posteriormente se referencian los número de filos por cada plaquita, Figura 4.16.





**Figura 4.16** Caja de plaquitas con identificación de filo por tipo de ensayo.

Por otro lado, la información con la que identifica cada ensayo se codifica mediante un conjunto de códigos exclusivos, que se corresponden con la Tabla 4.10

**Tabla 4.10** Codificación de ensayo.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0001	CR	XX	X	P01	VXXX	fXX	BX	CX

Dónde,

- Los primeros cuatro dígitos corresponden al número consecutivo de la caja donde se almacena las plaquitas.
- La segunda casilla determina si la plaquita cuenta con recubrimiento (CR).
- La tercera casilla representan al número de plaquita asignado para cada ensayo, equivalente a 2 dígitos en un rango entre 01 al 10.
- La cuarta casilla está representada por la abreviatura a, b ó c que identifica el filo de la herramienta que se ha empleado para dicho ensayo, el cual se encuentra identificado en la parte inferior de la plaquita y en sentido de las manecillas del reloj, iniciando desde la impresión lateral de la plaquita según el proveedor.
- En la quinta posición se encuentran los dígitos PXX, que identifican la profundidad de corte determinada por la geometría de la probeta de ensayo.
- En la sexta posición, los dígitos VXXX representan la velocidad de corte en las que se ejecutó el ensayo en función con los parámetros tecnológicos de corte (m/min).
- En la séptima posición, se establecen los dígitos fXX y que proporcionan los datos del avance de la herramienta en función con los parámetros tecnológicos de corte asignados para este ensayo (mm/r).
- En la octava posición, se representa los dígitos BX, cuyo propósito es identificar el bloque de trabajo en función de los parámetros tecnológicos de corte asignados para este ensayo, con rango B1, B2 y B3.
- Por último, los dígitos CX sirven para identificar la corona de trabajo en función con los parámetros tecnológicos de corte asignados para este ensayo, con rango C1, C2 y C3.

Por tanto, para cada  $V_c$  se han considerado 4 escenarios con respecto a  $f$ , dando como resultado la siguiente tabla:

**Tabla 4.11** Resumen de ensayos con respecto a  $V_c$  y  $f$ .

$f$ [mm/r]	$V_c$ [m/min]					
	30	45	65	80	100	125
0,05	10	10	10	10	10	10
0,1	10	10	10	10	10	10
0,2	10	10	10	10	10	10
0,3	10	10	10	10	10	10

Se observa que en esta investigación se ha considerado un gran número de ensayos por cada variable de estudio, resultando un total de 240 cortes (10 repeticiones para cada una de las 6  $V_c$  en sus 4 combinaciones con respecto a  $f$ ). Por otra parte, es preciso seguir con el programa de trazabilidad propuesto con anterioridad, para evitar posibles incongruencias a la hora de analizar los datos. En la Tabla 4.12, se muestran los ensayos estipulados con respecto a la  $V_c$  en relación a la geometría de la probeta y la variable  $f$ , que a su vez está vinculada con la herramienta de corte y su filo correspondiente.

Cabe recordar que la plaquita cuenta con 6 filos de corte. Sin embargo, para este estudio solo se ha considerado oportuno utilizar 3 de ellos, siendo están elegidos en sentido horario, con el propósito de facilitar e identificar su manejo antes y después del corte.

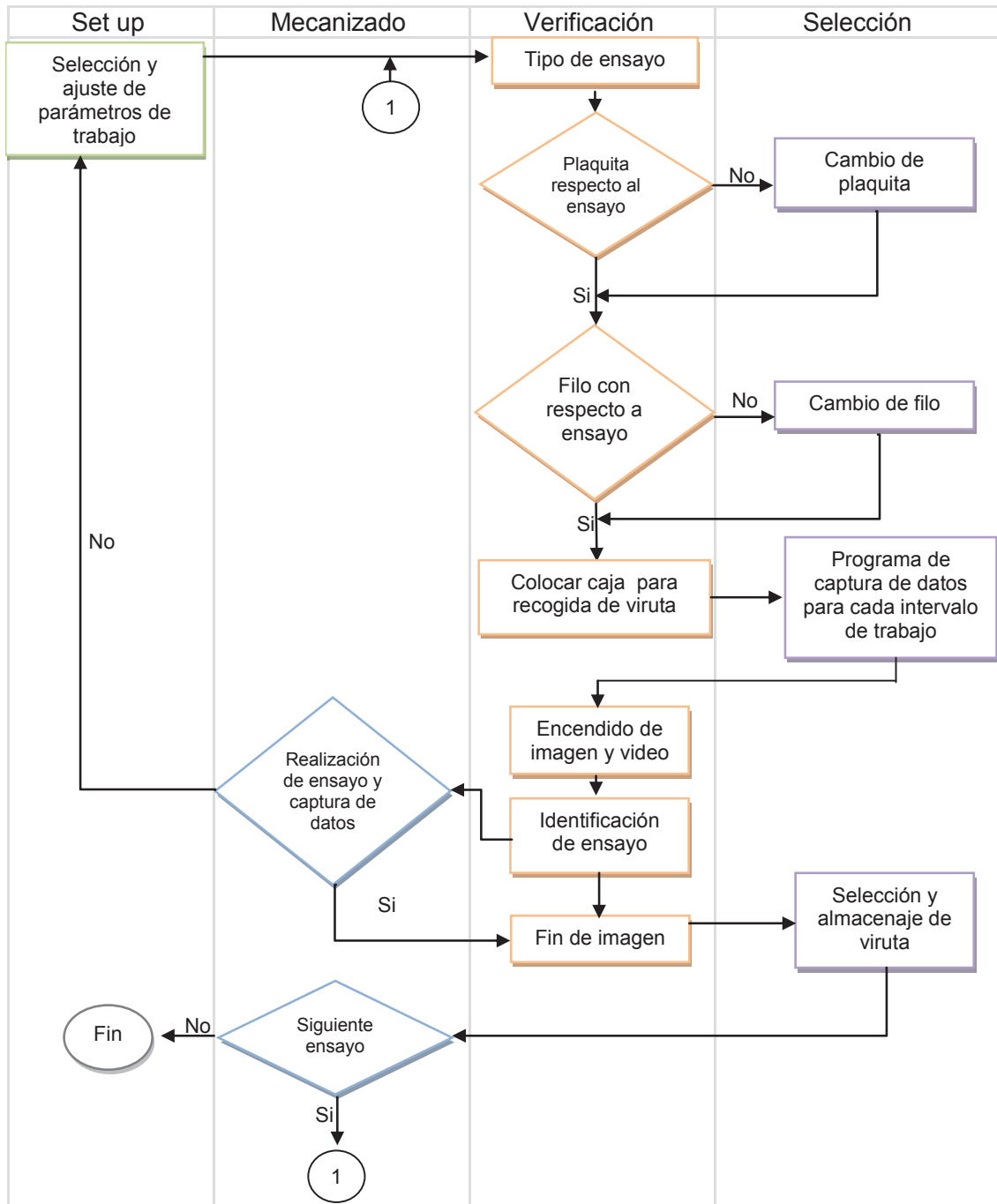
**Tabla 4.12** Resumen de ensayos con respecto  $V_c$  y  $f$ .

$f$ [mm/r]	$V_c$ [m/min]					
	30	65	80	125	45	100
	B1C1	B1C2	B2C1	B2C2	B3C1	B3C2
0,05	1 filo -a	2 filo -b	3 filo -c	5 filo -a	6 filo -b	7 filo -c
0,1	1 filo -b	2 filo -c	4 filo -a	5 filo -b	6 filo -c	8 filo -a
0,2	1 filo -c	3 filo -a	4 filo -b	5 filo -c	7 filo -a	8 filo -b
0,3	2 filo -a	3 filo -b	4 filo -c	6 filo -a	7 filo -b	8 filo -c

#### 4.5.2 Protocolo de ensayo

Para lograr con éxito la ejecución de ensayos fue necesario establecer un protocolo de trabajo con el objetivo de identificar los efectos de las variables independientes que interactúan durante el mecanizado, definiendo los medios necesarios para la obtención de datos empíricos que permitan plasmar el comportamiento del corte mediante la caracterización de la viruta.

En este apartado se identifica, de forma ordenada y secuencial, cada una de las actividades que integran este protocolo de ensayo, encontrándose completamente desarrolladas en el Anexo V (Protocolo de ensayos) y, de forma resumida, en el diagrama de flujo de la Figura 4.17.



**Figura 4.17** Diagrama de flujo para la realización de ensayos.

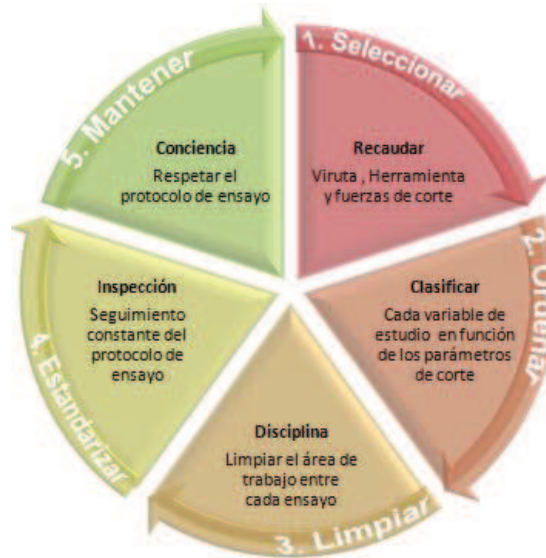
Dichas actividades conforman la metodología propuesta a lo largo de este capítulo, basándose en el estudio de la viruta obtenida durante el mecanizado de la aleación estudiada, e integrando dos aspectos de gran importancia que repercuten en la economía del proceso: la vida de la herramienta y las fuerzas de corte necesarias para ejercer dicho corte.

#### 4.5.3 Selección y trazabilidad de la muestra de estudio

A fin de lograr que todos los objetivos estipulados en esta tesis se lleven a cabo, es de suma importancia recurrir a diversas técnicas para el control y análisis de los datos, algunas de las cuales ya han sido analizadas con anterioridad.



Sin embargo, existe un método diferente a los ya mencionados cuyo beneficio permite incrementar la eficiencia durante la ejecución de los ensayos, consistiendo en el uso de los cinco principios básicos de la herramienta 5's [31], adaptados a las necesidades de este estudio, con el que se logra reducir posibles causas potenciales de error humano, omitiendo factores claves del ensayo, tal como se aprecia en la Figura 4.18.



**Figura 4.18** Conceptos básicos de 5's adaptados a la ejecución de ensayos

Como primer paso, se tomarán y seleccionarán las muestras físicas, en este caso de fragmentos de viruta, así como la herramienta de corte y los valores de fuerza de cada escenario, mencionados con anterioridad. Con este fin, se hace hincapié en el correcto manejo de las muestras durante el mecanizado, lo cual está estrechamente ligado con la trazabilidad de los resultados adquiridos.

Posteriormente se procederá a clasificar e identificar las muestras de cada ensayo por medio de una codificación, realizando ésta en relación a los parámetros con los que fueron realizados y su número de ensayo.

No obstante, dentro de este marco de ideas es necesario realizar una evaluación previa de los resultados y las variables de estudio a través de un conjunto de fotografías tomadas desde distintos ángulos del proceso, así como la filmación de vídeos con el objetivo de registrar el comportamiento de la viruta al desprenderse de la zona de corte e identificar alguna anomalía durante el proceso. Su catalogación se establece mediante el formato de clasificación mostrado en la Tabla 4.13.

**Tabla 4.13** Formato para clasificar los datos adquiridos en cada ensayo

Ensayo	$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/r]			
		0,05	0,1	0,2	0,3
B1C1V30	30	Macroscópica y microscópica de viruta Macroscópica de herramienta de corte			
B1C2V65	65				
B2C1V80	80				
B2C2V125	125				
B3C1V45	45				
B3C2V100	100				

Los datos aportados en dicha tabla son de gran ayuda para identificar de forma global la situación de cada ensayo. Por ello, se recomienda ordenar la progresión de imágenes conseguidas en cada escenario de corte en función a los distintos valores de  $f$ , a fin de tener una visión general del proceso de corte. Mediante la imagen macroscópica permite caracterizar la tendencia que muestra la viruta en cada escenario de corte.

Este esquema facilita la clasificación atendiendo a la morfología y siguiendo los criterios establecidos en la normativa ISO 3685:1993 y UNE 16148:1985 [17, 18], en lo que respecta a la viruta y el aspecto de la herramienta. Las evidencias, tanto gráficas como físicas, pueden ser analizadas bajo ciertos estudios específicos, según sea el caso, tal como se menciona en el punto 4.7, estando reflejada su evaluación en el capítulo 5.

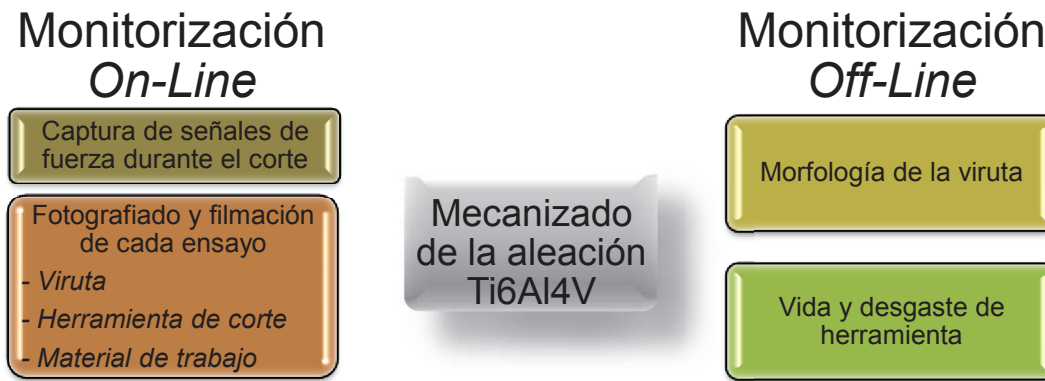
Debe cuidarse la limpieza y el ajuste de la máquina-herramienta, el material mecanizado y la herramienta se realiza antes, durante y después de cada ensayo, para evitar la contaminación de las muestras y, a su vez, facilitar la ejecución del mecanizado. También se indica que la estandarización de cada actividad facilita el oportuno seguimiento mediante la inspección de las dimensiones de la pieza en relación con la secuencia de trabajo. Una actividad que contribuye a la eficacia de los ensayos es la estricta observancia de cada procedimiento establecido, lo que permite distinguir con facilidad una situación normal de otra anormal, mediante el seguimiento del protocolo de ensayo.

#### **4.6 Análisis de los resultados basado en técnicas de monitorización**

De acuerdo con los requerimientos de control de los proceso de corte, se aplican las técnicas de monitorización de manera continua y sistemática, verificando la eficiencia de cada uno de los ensayos establecidos en esta tesis. Esto permite extraer una visión general e identificar el papel que desempeña cada variable y el medio de interacción que existe entre ellas durante el mecanizado.

Estas técnicas son comúnmente utilizadas y nombradas de distintas formas (métodos directos e indirectos, monitorización dentro y fuera del proceso, por mencionar algunos). Sin embargo, tienen un mismo fin, que es lograr la evaluación de un parámetro o sistema relacionado con el proceso de corte en función de su relación como la serie de datos que pueda aportar. Estas técnicas auxilian de forma positiva al análisis e interpretación del mecanizado, repercutiendo en la toma de decisiones. Por ello, es conveniente detallar cada técnica y justificar su aplicación a esta investigación.

Al inicio de este capítulo se mencionó que dentro de la metodología experimental se tiene en consideración ciertos estudios específicos para lograr la caracterización del mecanizado de la aleación con base titanio *Ti6Al4V*, a través del análisis morfológico de la viruta y, a su vez, identificar el grado de alteración geométrica que sufre la herramienta de corte durante el proceso, de acuerdo con los datos adquiridos de las fuerzas de corte en cada escenario. En la Figura 4.19 se describe, de forma gráfica, las técnicas elegidas según las variables de estudio y el medio de obtención de los datos deseados.



**Figura 4.19** Esquema sobre las técnicas de estudio establecidas en esta tesis.

#### 4.6.1 Monitorización On-Line

La monitorización *On-Line* permite capturar en tiempo real la situación del proceso de mecanizado. En la actualidad tiene gran aceptación, por ser un método que logra integrar (mediante el uso de sensores, técnicas de medición y hardware para la adquisición de datos y cámaras de video) con exactitud lo ocurrido durante el proceso de corte.

Entre los métodos más comunes se ha optado por capturar las variaciones resultantes en las fuerzas de corte durante la ejecución de cada ensayo. Para ello se han considerado metodologías de otras investigaciones vinculadas a este método y propuesto un procedimiento viable en base a los recursos disponibles para este estudio [32-36].

Referente a lo mencionado, se ha diseñado una metodología para medir las fuerzas de corte mediante el uso de un sensor dinamométrico, habilitado en 2 ejes (mencionado previamente en el punto 4.4.4), que permite capturar los componentes de fuerza  $F_c$  y  $F_f$  de cada escenario de corte, y que estarán representados por una nube de datos de forma gráfica especial, debido a su geometría de corte, en relación a los parámetros tecnológicos establecidos. Como complemento a este punto, se ha considerado, como parte de este método, la filmación de imágenes secuenciales de cada bloque de trabajo, con el propósito de capturar el momento clave de cada ensayo.

#### 4.6.2 Monitorización Off-Line

El uso de la monitorización *Off-Line* ha sido un factor clave para el desarrollo esta tesis, ya que permite obtener mayor precisión en aspectos importantes de las variables de estudio que son difíciles de visualizar durante el proceso de corte. No obstante, es imposible ejecutarlas las dos monitorizaciones de manera conjunta, ya que una de ellas, se requiere haber finalizado los ensayos de mecanizado.

Esta sección pretende justificar las dos vertientes elegidas para llevar a cabo la monitorización *Off-Line*. Una de ellas será empleada durante el análisis de fragmentos de viruta, dando como resultados información muy útil sobre el mecanismo del corte.

Para ello se ha recurrido a las técnicas metalográficas, descritas más adelante, de modo que esta tesis trabajará en paralelo con la obtención de aspectos geométricos y

microgeométricos de la viruta a través de estudios tanto microscópicos como macroscópico.

La otra vertiente corresponde al análisis geométrico de la herramienta de corte a través de sus alteraciones físicas causada durante el proceso de corte. Existe una gran diversidad de métodos que permiten evaluar la integridad de la herramienta de corte y la repercusión de sus efectos en ella, lo que influye sobre su coste, objetivo del estudio [37]. Sin embargo, en esta investigación se ha considerado realizar estudios microscópicos de la herramienta de corte.

#### **4.7 Análisis metalográficos**

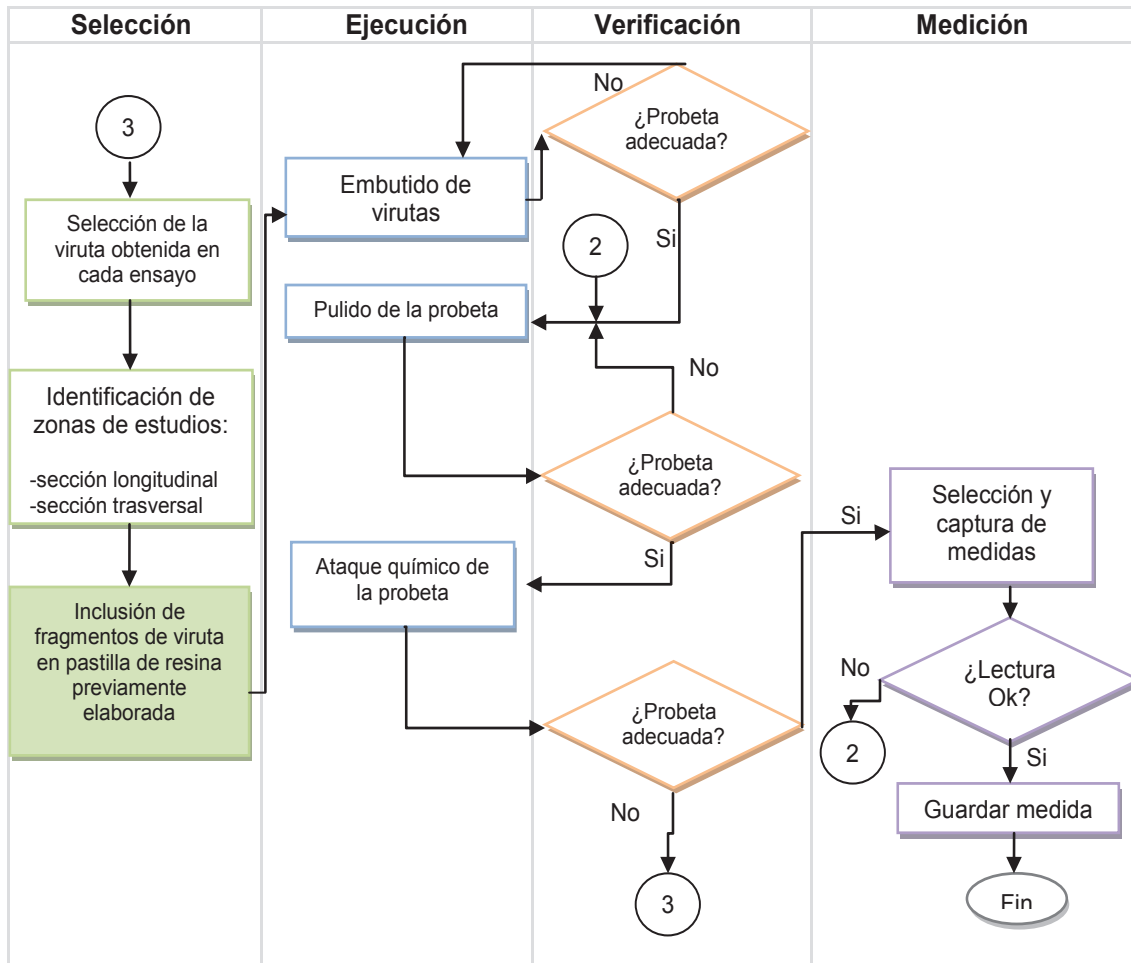
Este apartado está compuesto de una serie de procedimientos normalizados en la rama de ciencias de materiales con la finalidad de comprobar las características y propiedades de la muestra o posibles defectos generados en el proceso. Es importante resaltar que el éxito en esta etapa depende, en gran medida, del método utilizado en la preparación de la muestra así como del equipamiento básico para realizarlo. Para ello, se han adaptado protocolos según la variable de estudio, siendo preciso realizar estudios microscópicos tanto en la viruta como en la herramienta de corte, los cuales se detallan en el siguiente punto.

Por otra parte, con los estudios macroscópicos se ha caracterizado el mecanizado del material elegido, a través del análisis físico tanto de la viruta como de la herramienta, permitiendo identificar la tendencia en cada escenario de corte. Para cubrir esta necesidad se han diseñado procedimientos que serán analizados de forma independiente.

##### **4.7.1 Estudios microscópicos**

La importancia de realizar estudios de microscopía en esta investigación se debe a que aportan información clave, que permite conocer el comportamiento del material a evaluar durante su mecanizado a través de la amplificación de imágenes relacionadas con las mediciones geométricas de la viruta y de la herramienta de corte realizada en un microscopio óptico.

Este estudio es empleado en el ámbito científico para el análisis de fallas metálicas; refiriéndose a posibles grietas o bien, un posible daño catastróficos en la herramienta de corte. Aportando aspectos claves para el control de todo proceso de fabricación. Para ello se han establecido procedimientos que facilitan la manipulación de la viruta y su observación, tal como se detalla en la Figura 4.20.



**Figura 4.20** Diagrama de flujo para la elaboración de ensayos microscópicos en fragmentos de viruta.

Antes de proceder con lo antes mencionado, se hace hincapié que cada ensayo está representado por una muestra significativa de las virutas en relación con la herramienta de corte.

#### 4.7.1.1 Estudios microscópicos a fragmentos de viruta

Con respecto al análisis de la viruta, se establece una breve descripción de cada uno de los pasos previos a la observación en el microscopio, comenzando por la embutición de la muestra y siguiendo con las distintas fases de preparación de la misma, Tabla 4.14.



**Tabla 4.14** Procedimiento de selección y almacenamiento de fragmentos de viruta.

Ayuda visual		Descripción del proceso
Selección de muestra		<p>Es un paso importante ya que debe satisfacer las condiciones estadísticas en una sección limitada de forma aleatoria. En este caso se recomienda seleccionar diversos fragmentos de viruta e identificar de acuerdo a los parámetros en las que fueron expuestas.</p> <p>Se recomienda realizar un corte de forma transversal (corte transversal: determinar la naturaleza del material, homogeneidad, segregaciones; corte longitudinal: se utiliza para controlar los procesos de fabricación de piezas) a los fragmentos de viruta (considerando la espiral de la viruta). El corte se realizará de forma manual (evitando el calentamiento de la muestra).</p>
Preparación de muestra		<p>Este paso tiene como objetivo facilitar la correcta manipulación y proyección de las características geométricas de la viruta en detalle. Por lo tanto, es necesario embutir la viruta en una probeta de resina. En este proceso se utiliza resina termoplástica y su montaje se realizará en caliente.</p> <p>La resina elegida en el estudio es ClaroFast para el análisis microscópico y PolyFast para la evaluación por electrónica de barrido.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ClaroFast: acrílico termoplástico de apariencia transparente. Se utiliza para montajes transparentes en vidrio, muestras porosa y, aislantes eléctricos superficiales.</li> <li>✓ PolyFast: resina fenólica con carga de carbono, termoendurecible y apariencia oscura. Conductora de la electricidad, baja emisión en la cámara de vacío para la aplicación de examen al microscopio electrónico de barrido.</li> </ul>
Inclusión de muestra		<p>Una vez realizada la probeta base, se adhieren fragmentos de viruta y se procede a colocar la probeta en la embutidora. Nuevamente se repite la operación de montaje bajo los siguientes parámetros: colocar 10 ml sobre la probeta con viruta, se reduce el tiempo de calentamiento y enfriamiento a un 10% de los parámetros de trabajo; en este caso refiriéndose a la fuerza necesaria del pistón de la embutidora de 35 N, tiempo de calentamiento 7 min, tiempo de enfriamiento 8 min. Y, finalmente la temperatura constante a 180 °C, para una proporción equivalente a 25 ml para iniciar una preforma de resinas.</p>

Continuación de procedimiento	
Ayuda visual	Descripción del proceso
<b>Pulido de muestra</b> 	<p>El objetivo del desbaste es obtener una superficie plana, libre de toda huella de marcas de herramientas, brindando un aspecto de la superficie igual al de un espejo.</p> <p>Consumibles para el desgaste:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ MD-Primo™, es un disco de metal con una capa adhesiva de un lado utilizado para su desbaste de forma agresiva ( parámetros de trabajo: velocidad de 150 r/min , con un tiempo de 5 min y una fuerza de 30 N).</li> <li>✓ MD-Largo™, es un disco de material composite para desbaste medio (parámetros de trabajo: velocidad 150 r/min, con un tiempo de 7 min y una fuerza de 30 N).</li> <li>✓ DAC para el acabado final (parámetros de trabajo: una velocidad de 150 r/min, con un tiempo de 2 min y una fuerza de 25 N).</li> </ul> <p>En caso de utilizar la resina Polyfast es necesario emplear los parámetros de calentamiento a 6 min, una temperatura de 180°, con una fuerza de 30 N y un tiempo de 2 min para su enfriamiento.</p>
<b>Ataque de muestra</b> 	<p>El ataque químico tiene como finalidad revelar la microestructura del material a evaluar. El proceso se inicia sumergiendo la muestra en un reactivo adecuado. Posteriormente se limpia la probeta y se enjuaga con alcohol. Finalmente se seca con corriente de aire.</p> <p>En este caso se establecen parámetros y reactivos químicos a utilizar: 100ml aprox. de H<sub>2</sub>O, 1-3 ml de Ácido fluorhídrico (HF) y 2-6 ml de Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) en un tiempo de 15 s.</p> <p>Nota: Se recomienda utilizar un desecador y el emplear las normas ASTM E304-E407.</p>
<b>Captura de medida</b> 	<p>Es importante indicar que se requiere un software de imagen que sea compatible para la captura de medida de la muestra a evaluar y que éste será aplicado para la medición del desgaste de la herramienta.</p> <p>Una vez capturada la imagen, se procede a su medición por medio de líneas tangenciales determinando el comportamiento de la viruta y el estado de la herramienta de corte, según datos del ensayo.</p> <p>Nota: para lograr dicho objetivo se requiere determinar las zonas de interés tanto en la viruta como en zona de desgaste de la herramienta.</p>



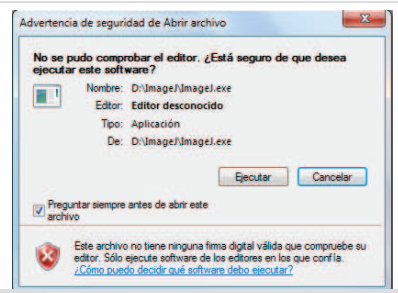
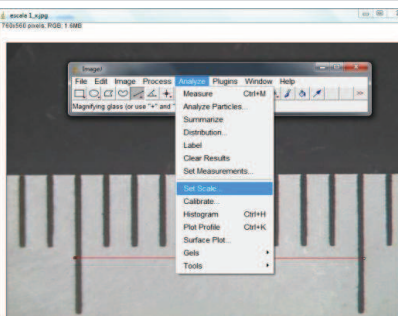
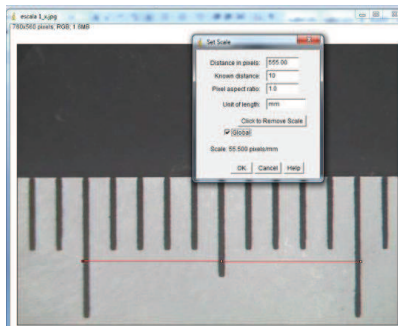
Como se puede observar, la última fase de este procedimiento está relacionada con la captura de las mediciones de la geometría de la viruta y de la herramienta utilizada en cada ensayo. Para ello, se procedió a su observación mediante el uso de técnicas de Microscopía Óptica Estereoscópica (SOM, *Stereoscopic Optical Microscopy*).

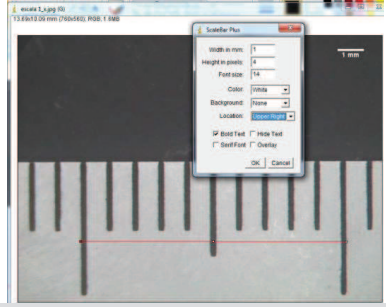
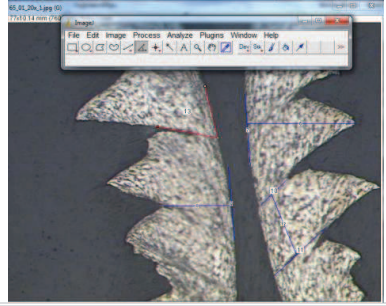
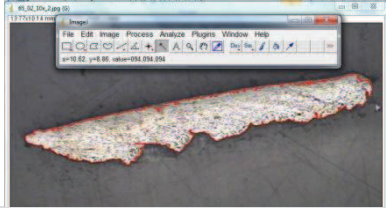

Para ello se ha empleado un microscopio estereoscópico modelo Nikon Optiphot 280 serie 460774, con un rango de 1.5X - 400X, con cámara Kappa ImageJ Base mod. CF11 DSP, tarjeta PCI SC, con fuente emisora de luz Intralux 400 marca Volpi, con adaptadores para emisión anular. La captura de imagen y las mediciones se realiza haciendo uso del software OmniMet de Buehler y para su medición fue necesario la plataforma comercial ImageJ, para la medición de los aspectos que caracterizan cada variable.

#### 4.7.1.2 Tratamiento de imagen mediante el software ImageJ

Antes de continuar con la evaluación geométrica de la viruta y de la herramienta de corte, se indica que para el tratamiento de imágenes para extraer su medida se ha realizado de acuerdo con el protocolo establecido por el grupo de investigación, el cual se recoge en la Tabla 4.15.

**Tabla 4.15** Protocolo para el tratamiento de imagen.

Descripción	Ayuda Visual
<ul style="list-style-type: none"><li>- Descarga del programa para el procesamiento de imagen digital de dominio público. Permite editar, analizar, procesar, guardar e imprimir imágenes, calculando las áreas y las estadísticas de valor de la medida deseada.</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- Una vez descargado el programa, es necesario exportar la escala adecuada (mediante imagen); donde posteriormente será necesario el procedimiento de calibración acorde a la amplificación que se desea medir y la escala de referencia.</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- Crear un patrón de escala de medida, realizando la conversión sobre la medida conocida, mediante una línea de referencia que se utiliza para introducir los parámetros conocidos en estos casos, la magnitud real y los pixeles equivalentes relacionados con la imagen.</li></ul>	

Continuación de procedimiento	
Descripción	Ayuda Visual
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se confirma y se activa una escala de referencia para confirmar como referenciar su medida.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Una vez obtenido los factores de conversión, se procede en extraer la imagen que se desea medir y se traza los aspectos geométricos elegidos para cada imagen. Dicho programa permite seleccionar diferentes tipos de trazo de los cuales se representan a través de una tabla que permite clasificar las medidas y las unidades de cada trazo.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- En el caso de conocer el área de la viruta, el programa contiene una opción que permite relacionar la escala de medida con el perímetro del área a medir.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- En el caso de medir los aspectos geométricos de la herramienta de corte, es necesario aplicar el mismo procedimiento realizados en la viruta desde la selección del patrón (escala) acorde con la ampliación de la imagen y, posteriormente, se procede a medir la sección del desgaste o el aspecto deseado.</li> </ul> <p>Y en relación a ello, se muestran las zonas elegidas para medir la evolución del desgaste observado (medición de cráter en cara de desprendimiento y flanco en la cara incidencia), permitiendo establecer pautas de comportamiento evolutivo de la herramienta en distintos escenarios de corte.</p>	

Es importante indicar que la precisión de la medición está relacionada con la fiabilidad y habilidad del usuario en el momento de realizar la medida, de ahí la importancia de llevar a cabo un riguroso seguimiento del protocolo propuesto.

#### 4.7.1.3 Estudios microscópicos en la herramienta de corte

Es importante destacar que en este apartado se tiene en consideración la caracterización morfológica de la herramienta de corte mediante su fotografiado a distintos ángulos, basándose en la siguiente ayuda visual (Figura 4.21), para posteriormente ser observada mediante microscopía.



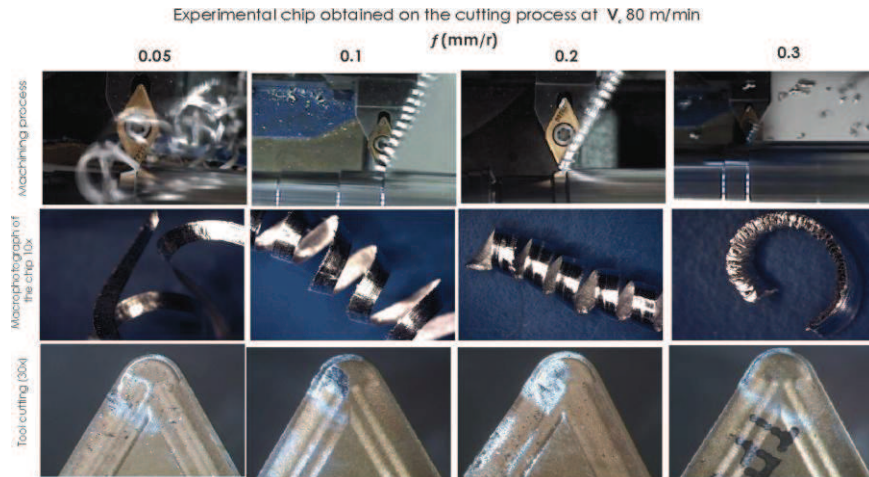
**Figura 4.21** Ejemplo de imágenes para la caracterización de la herramienta a distintos zoom.

A través de este estudio se caracterizan las posibles alteraciones geométricas de la herramienta mediante la evolución del desgaste en las caras de incidencia y de desprendimiento. Para ello, se realizaron observación con distintas ampliaciones, en este caso desde 10X a 63X mediante el uso de un microscopio estereoscópico, el cual fue mencionado previamente.

#### 4.7.2 Estudios macroscópicos

El objetivo general de llevar a cabo los estudios macroscópicos está orientado a identificar el mecanizado mediante grabaciones en vídeo y fotografiado de cada etapa del proceso, registrando el comportamiento de la viruta en tiempo real, así como cualquier tipo de incidencia reflejada en la herramienta de trabajo durante el mecanizado. Para ello, una vez finalizado el proceso de corte, se procede a recoger la viruta generada y la herramienta correspondiente, identificada mediante un código previamente estandarizado, siguiendo metodologías aplicadas con anterioridad. Este código será empleado para correlacionar los datos de estudio y los criterios a evaluar. Se procederá a analizar el aspecto físico de la viruta y de herramienta a través de los criterios establecidos en las normas ISO 3685:1993 y UNE 16148:1985 [17, 18], con el objetivo de identificar la influencia de los parámetros tecnológicos en el comportamiento del mecanizado del material, siguiendo el ejemplo visualizado en la Figura 4.22.





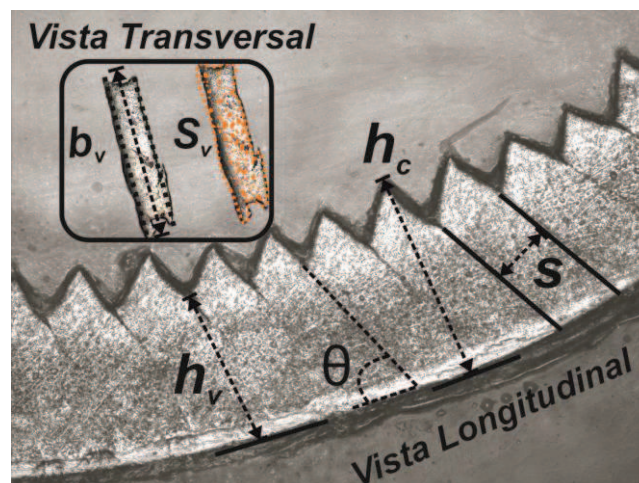
**Figura 4.22** Ejemplo de selección y trazabilidad de las muestras durante el mecanizado de una aleación ligera. Adaptada [38].

#### 4.8 Caracterización previa de resultados

Concluida la etapa 2 de esta metodología experimental, se pasa a la etapa de caracterización basada en el análisis e interpretación de los resultados experimentales obtenidos. Con este fin, en esta sección se identificarán variables de interés como el aspecto geométrico de la viruta o el desgaste de la herramienta y, a su vez, se analizará la evolución de las fuerzas de corte. Para ello, es necesario generar un análisis independiente para cada variable y, posteriormente, relacionar los resultados con los parámetros tecnológicos correspondientes a cada ensayo mediante la generación de un informe.

##### 4.8.1 Morfología de la viruta

Los aspectos geométricos de la viruta son una parte esencial en la caracterización del mecanizado y, a causa de ello, es conveniente definir la zona a analizar, empleando para ello lo indicado en la Figura 4.23, en la que se identifican los parámetros que caracterizan la geometría de la viruta, en este caso de tipo segmentada, distinguida por su forma en dientes de sierra, que es la obtenida en el mecanizado de aleaciones de titanio.

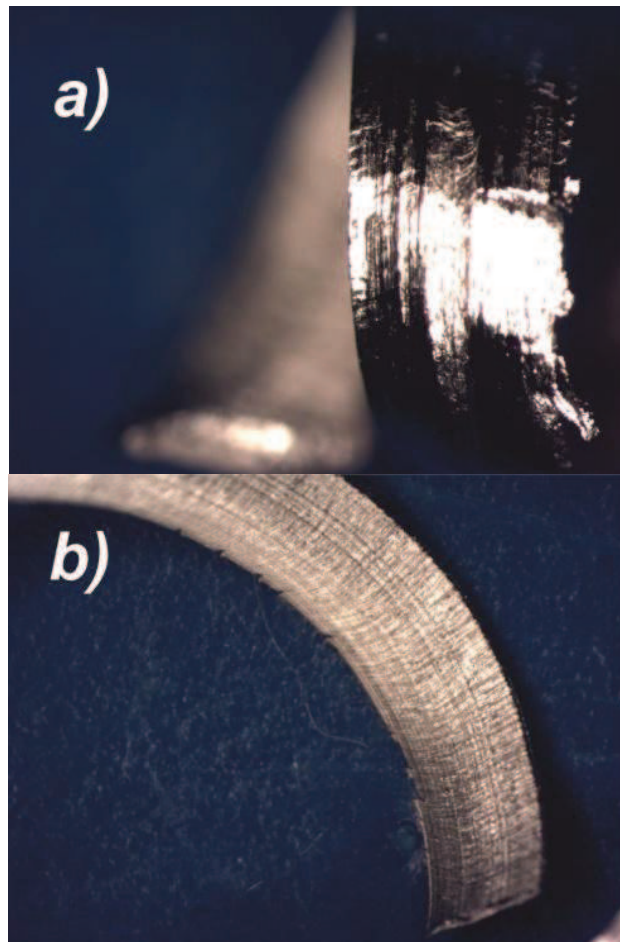


**Figura 4.23** Parámetros geométricos de la viruta.

En la Figura 4.24 se muestra su aspecto físico en relación a los criterios establecidos en las normas ISO 3685:1993 y UNE 16148:1985 [17, 18].

En el marco bibliográfico, desarrollado en el Capítulo 2, se ha indicado que es posible visualizar microscópicamente la viruta en dos formas: de manera longitudinal, permitiendo conocer parámetros importantes como la altura de cresta  $h_c$ , la altura de valle de la viruta  $h_v$ , la sección de viruta  $S$  (distancia entre valles) y el ángulo complementario  $\theta$ , que servirá para calcular el ángulo de cizalla  $\phi$ ; en la sección transversal se identifica el área  $S_v$  y el ancho de la viruta  $b_v$ .

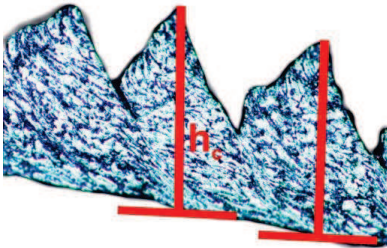
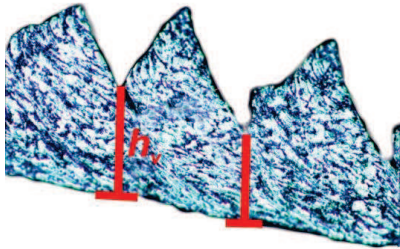
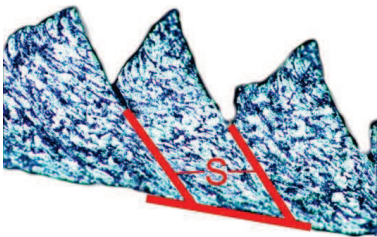
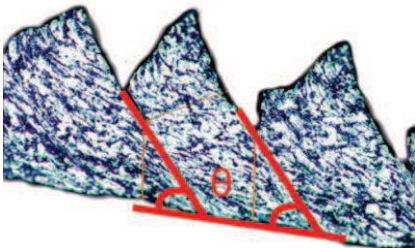

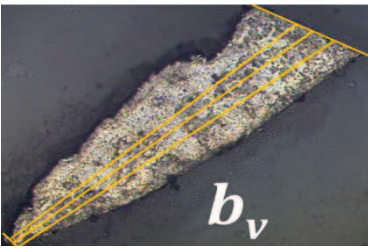
Los valores de estos parámetros se han obtenido mediante el valor medio de las mediciones realizadas en distintos puntos de la viruta. A partir de ellos es posible calcular, de forma indirecta, otros parámetros geométricos de interés, como el factor de recalado  $\zeta$  y el grado de segmentación  $G_s$ .



**Figura 4.24** Aspectos físicos de la viruta, a) Cara externa y b) Cara interna de la viruta.

Por otro lado, en la Tabla 4.16 se detalla la representación gráfica de los aspectos geométricos de la viruta.

Tabla 4.16 Guía para la medición de la viruta.

Sección de viruta	Descripción de toma de medida
	La cresta de la viruta $h_c$ se obtiene midiendo, de forma perpendicular al corte, desde una línea tangencial imaginaria al borde, hasta la altura máxima de la viruta.
	El valle de la viruta $h_v$ se obtiene midiendo, de forma perpendicular al corte, desde una línea tangencial al borde, hasta la altura menor de la viruta.
	Para este análisis el valor de la sección de la viruta $S$ , se considera la distancia entre valles, con la finalidad de obtener el tamaño de las bandas de deformación y comparar la relación con los parámetros de corte. Es importante indicar que para obtener dicha medida es necesario trazar una línea imaginaria perpendicular con respecto a la superficie de deslizamiento.
	El ángulo complementario $\theta$ se mide trazando una línea paralela al corte; es el ángulo entre la superficie de deslizamiento y la tangente al corte, de forma que su intersección revelara el valor del ángulo de corte.
	Para el análisis del área de la viruta $S_v$ , se considera el contorno de la viruta.
	El ancho de la viruta $b_v$ es la distancia longitudinal de la viruta, visualizada de forma transversal, por lo que se obtiene trazando una línea perpendicular en los extremos de la viruta. Para este caso se considera necesario la realización de 3 trazos, cuyo valor medio representa el valor esperado.

Nota: En el caso de los parámetros con cálculo indirecto (es decir:  $G_s$  y  $\zeta$ ), se aplican las ecuaciones 2.18 y 2.19 expuestas en el capítulo 2.



#### 4.8.2 Herramienta de corte

En este apartado se tiene en consideración caracterizar las posibles alteraciones geométricas de la herramienta sufridas durante el proceso de corte. El estudio de la optimización de la vida de la herramienta se encuentra en un constante evolución, con el objetivo de lograr un eficiente uso de la herramienta en intervalos óptimos, manteniendo la precisión dimensional y reduciendo su desgaste. En esta tesis se han comparado investigaciones ligadas a la aleación de titanio en relación a los parámetros tecnológicos del tipo de corte empleado, dado que ambos aspectos están relacionados con la morfología de la viruta [37-42]. En base a ellos se ha generado una metodología de trabajo que permite obtener los datos necesarios para su evaluación. El intervalo de tiempo en el que fue expuesta la herramienta de corte es el correspondiente a los 10 ensayos establecidos en cada escenario de corte, es decir, en cada uno de dichos escenarios las condiciones de corte  $V_c$  y  $f$  son constantes.

#### 4.8.3 Fuerzas de corte

Para caracterizar la evolución temporal de las fuerzas ejercidas en la primera etapa del mecanizado (conocida como régimen transitorio), es preciso analizar la amplitud de la señal extrema correspondiente a la fuerza de corte causada por el impacto inicial de la pieza con la herramienta.

Sin embargo, para proceder con su análisis, es necesario identificar la ventana de estudio sobre la señal recibida de cada ensayo, de acuerdo a su evolución representada en la Figura 4.26. Para identificar la evolución de la fuerzas de corte se han considerado diferentes zonas o divisiones de la señal en función del tiempo de mecanizado, bajo la condiciones de cada conjunto de ensayos. Para cada uno de estos ensayos se genera un gráfico que representa la evolución de la fuerzas de corte en relación a las fases que presenta el mecanizado en un determinado tiempo.

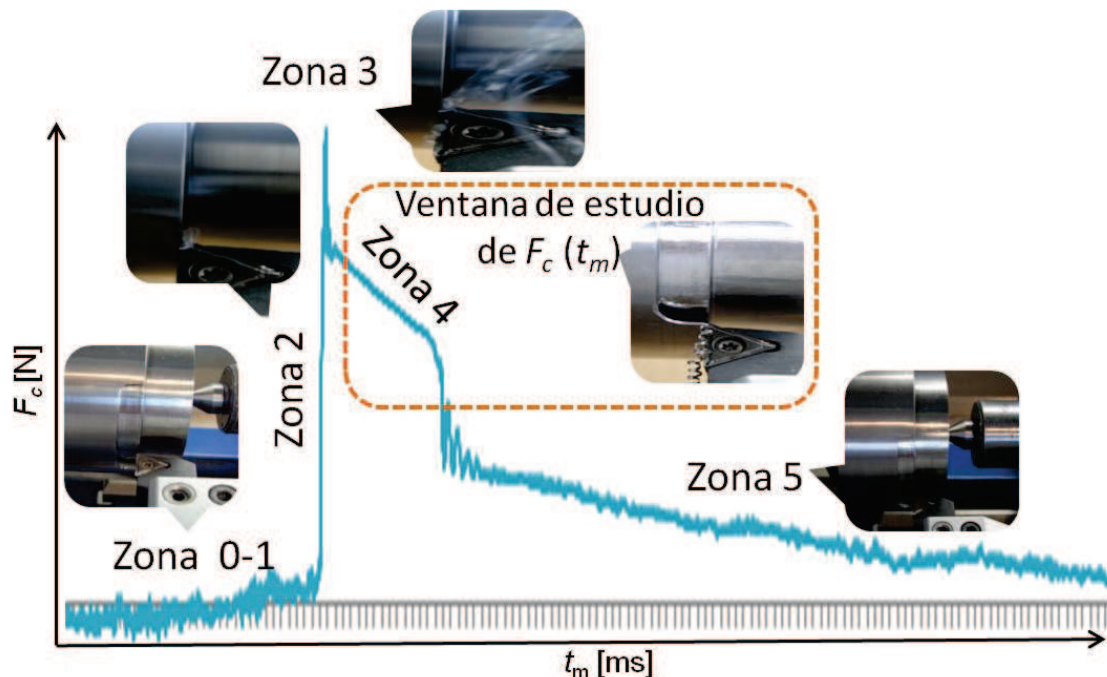


Figura 4.25 Ventana de estudio sobre la  $F_c$ .



Sobre la base de las ideas expuestas, se identifican 5 zonas de estudio. La zona 1 se corresponde con el tiempo transcurrido cuando la pieza recorre la sección denominada como desahogo  $t_d$ , coincidiendo con los primeros instantes de corte (periodo transitorio de aceleración desde la puesta en marcha hasta alcanzar la velocidad de giro constante, en el que la herramienta no realiza corte); la zona 2 representa el intervalo de tiempo  $t_2$  que en el que se generan los primeros cambios significativos de  $F_c$ , hasta llegar al punto máximo (por el contacto de la herramienta con la pieza, al finalizar la zona de desahogo, e iniciarse el corte); la zona 3 se corresponde con la relajación de las fuerzas transitorias a su estado pseudo-estable  $t_3$ ; la zona 4 acota el intervalo de fuerza pseudo-estable hasta un instante antes de finalizar el corte,  $t_4$ ; finalmente, la zona 5 representa la disminución del contacto herramienta-pieza hasta la salida de la herramienta, que alcanza nuevamente la zona de desahogo, y los últimos momentos del corte  $t_5$ . Por tanto, el tiempo total de mecanizado  $t_m$  está representado por la suma de los tiempos consumidos en estas cinco zonas; representada en la ecuación 4.6.

$$t_m = t_d + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 \quad (4.6)$$

En esta investigación se ha analizado la zona 4 (una vez eliminado el efecto de la entrada y salida de la herramienta de corte), determinándose las fuerzas mediante el valor medio global obtenido en los ensayos realizados en dicha zona.

Se considera la fuerza de corte  $F_c$ , que se encuentra ubicada en el eje Z, de forma perpendicular al eje del torno, en la dirección de la velocidad de corte. Por su parte, en el eje X se encuentra la  $F_f$ , localizada de forma axial y paralela a  $f$ . Ambas fuerzas han sido adquiridas para los rangos de valores de avance  $f$  y velocidad de corte  $V_c$ , mencionados en los capítulos anteriores. Sin embargo, el diseño del corte requiere que  $f$  sea fijo, es decir que la fuerza para vencer la resistencia del material dependerá del impacto inicial (a una revolución o giro del corte), tal como se indico en el punto 4.4.4.

#### 4.9 Conclusiones

En el presente capítulo se ha realizado una propuesta metodológica para la caracterización morfológica de la viruta como para la herramienta de corte utilizada en el procesos de torneado en seco de la aleación *Ti6Al4V* (UNS R56400), teniendo en cuenta su relación con parámetros y variables de entrada y/o salida asociados a la misma y al proceso.

Para ello, se han identificado y descrito las distintas etapas de la metodología experimental seguida, así como los recursos materiales e instrumentales empleados, aplicando diversas técnicas de monitorización que permiten controlar el seguimiento de la formación de la viruta y de otros parámetros geométricos de la misma; así como también fue posible identificar el desgaste de la herramienta a distintas perspectivas; es decir mediante la medición e identificación de la zona afectada (cara de desprendimiento e incidencia) y finalmente relacionar las fuerzas de corte adquiridas durante el proceso de corte.

La metodología propuesta puede ser aplicada para el análisis de otros materiales metálicos, adaptando ciertos aspectos a las características propias de la viruta, tales como la geometría de la herramienta para el mecanizado deseado. Sin embargo, su principal objetivo es transmitir las experiencias desarrolladas, por su carácter innovador, a otros usuarios, con la intención de que les sirva de complemento y puedan emplear la metodología desarrollada en otros procesos.

Por otro lado, en lo que se refiere al conocimiento de las  $F_c$ , se ha desarrollado un procedimiento alternativo para la obtención de datos, que puede ser extrapolado a otros trabajos relacionados con esta investigación. Éste ha demostrado ser un método alternativo que enfatiza el comportamiento transitorio de las fuerzas de corte durante los primeros instantes del mecanizado, permitiendo identificar aquellas variables que pueden afectar a la estabilidad del proceso de forma significativa.

Finalmente, gracias a los datos obtenidos, ha sido posible considerar, como líneas complementarias, la evaluación de los aspectos macrogeométricos de la viruta y el desgaste de la herramienta en relación con las fuerzas de corte.

## Referencias

- [1] EREA. From Air Transport System 2050 vision to planning for research and innovation. The association of European Research Establishments in Aeronautics, Amsterdam, Holland, (2010).
- [2] J. P. Immarigeon, R. T. Holt, A. K. Koul, L. Zhao, W. Wallace, J. C. Beddoes. Lightweight materials for aircraft applications. *Materials Characterization*, 35, (1995). 41-67.
- [3] E. O. Ezugwu. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, (2005). 1353-1367.
- [4] F. J. Trujillo Vilches. Análisis paramétrico del mecanizado en seco de la aleación UNS A97075. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, Málaga, España, (2013). ISBN:978-84-9747-776-5.
- [5] M. Batista Ponce. Características de los mecanismos de adhesión secundaria y su influencia en el desgaste de herramientas de corte. Aplicación al mecanizado en aleaciones ligeras. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, Cádiz, España, (2013).
- [6] J. M. Gerez Miras. Estudio del torneado en seco de la aleación Ti6Al4V. Relaciones paramétricas para el acabado superficial. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, (2014).
- [7] G. Welsch, R. Boyer, E.W. Collings. *Materials properties handbook: titanium alloys*: ASM international, (1993). ISBN:0871704811.
- [8] Clearwater Industrials. *Aerospace Global Report 2011*. IMAP, (2011).
- [9] S. Melkote, T. Newton, C. Hellstern, J. Morehouse, S. Turner. *Interfacial Burr Formation in Drilling of Stacked Aerospace Materials in Burrs – Analysis, Control and Removal*. ed Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, (2010). 89-98.
- [10] B. Denkena, P. Horst, C. Schmidt, M. Behr, J. Krieglsteiner. Efficient Production of CFRP Lightweight Structures on the Basis of Manufacturing Considerations at an Early Design Stage in New Production Technologies in Aerospace Industry. ed: Springer, (2014). 131-136.
- [11] M. Fernandes. Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, (2006). 70-75.
- [12] M. Calamaz, D. Coupard, F. Girot. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti–6Al–4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, (2008). 275-288.
- [13] S. Garg, D. Dornfeld, K. Berger. *Formulation of the chip cleanability mechanics in Burrs : Analysis, Control and Removal*. ed Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, (2010). 229-236.
- [14] M. Ávila, J. Gardner, C. Reich-Weiser, S. Tripathi, D. Dornfeld. *Strategies for Burr Minimization and Cleanability in Aerospace and Automotive Manufacturing*. Laboratory for Manufacturing and Sustainability. University of California, Berkeley, (2006). 11.
- [15] S. Kalpakjian, S. Schmid. *Manufacturing Engineering and Technology*. Fourth Edition ed.: Pearson, (2002).
- [16] J. Aurich, D. Dornfeld, P. Arrazola, V. Franke, S. Min. Burrs: Analysis, control and removal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, (2009). 519-542.
- [17] ISO 3685:1993 *Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools*. Genève, Switzerland, (1993).
- [18] AENOR 16148:1985 *Ensayos de duración de herramientas de torno de corte único*. Madrid, España, (1985).

- [19] R. Venkata. Environmental Aspects of Manufacturing Processes in Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes. ed: Springer, (2011). 339-360.
- [20] F. Klocke, G. Eisenblätter. Dry cutting. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 46, (1997). 519-526.
- [21] F. Nabhani. Machining of aerospace titanium alloys. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 17, (2001). 99-106.
- [22] N. Narutaki, A. Murakoshi, S. Motonishi, H. Takeyama. Study on Machining of Titanium Alloys. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 32, (1983). 65-69.
- [23] P. J. Arrazola, A. Garay, L. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, F. Le Maître. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). Journal of Materials Processing Technology, 209, (2009). 2223-2230.
- [24] A. Daymi, M. Boujelbene, S. B. Salem, B. H. Sassi, S. Torbaty. Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces. Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering, 1, (2009). 77-83.
- [25] E. P. Degarmo, J.T. Black, R.A Kohser. Materials and Processes in Manufacturing 10th Edition for Maine-Orono: John Wiley & Sons, Incorporated, (2010). ISBN:9780470767313.
- [26] A. A. Hamid, Y. Ali. Experimental determination of dynamic forces during transient orthogonal cutting. Journal of Materials Processing Technology, 55, (1995). 162-170.
- [27] S. Miyazawa, Y. Usui. Measurement of transient cutting force by means of a Fourier analyser. Precision Engineering, 7, (1985). 99-104.
- [28] M. E. Merchant. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. Journal of applied physics, 16, (1945). 267-275.
- [29] M. M. Nigm, M.M. Sadek, S. A. Tobias,. Determination of dynamic cutting coefficients from steady state cutting data. International Journal of Machine Tool Design and Research, 17, (1977). 19-37.
- [30] M. K. Das, S. A. Tobias. The relation between the static and the dynamic cutting of metals. International Journal of Machine Tool Design and Research, 7, (1967). 63-89.
- [31] F. R. Sacristán. Las 5S: orden y limpieza en el puesto de trabajo: FC Editorial, (2005). ISBN:8496169545.
- [32] H. K. Tönshoff, I. Inasaki. Sensors Applications, Volume 1, Sensors in Manufacturing. Sensors Applications, 1, (2001). 426.
- [33] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'donnell, D. Dornfeld. Advanced monitoring of machining operations. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 59, (2010). 717-739.
- [34] M. Sánchez Carrilero, M. Marcos Bárcena, M. Álvarez Alcón, M. Sánchez López, J. P. Contreras Samper. Relaciones paramétricas asociadas a la maquinabilidad de aleaciones de aluminio-cobre. in Anales de Ingeniería Mecánica,(1997). 59-66.
- [35] P. A. Rosa, O. Kolednik, P. Martins, A. Atkins, . The transient beginning to machining and the transition to steady-state cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, (2007). 1904-1915.
- [36] C. Lauro, L. Brandão, D. Baldo, R. Reis, J. Davim. Monitoring and processing signal applied in machining processes – A review. Measurement, 58, (2014). 73-86.
- [37] S. Dimla. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40, (2000). 1073-1098.
- [38] Y. Sánchez, F. J. Trujillo, L. Sevilla, M. Marcos. Study of the Influence of the Cutting Parameters on the Chip Geometry During Machining Alloy UNS A97075. Procedia Engineering, 132, (2015). 513-520.

- [39] A. Molinari, R. Cheriguene, H. Miguelez. Contact variables and thermal effects at the tool–chip interface in orthogonal cutting. *International Journal of Solids and Structures*, 49, (2012). 3774-3796.
- [40] M. N. Hamdan, A. E. Bayoumi. An approach to study the effects of tool geometry on the primary chatter vibration in orthogonal cutting. *Journal of Sound and Vibration*, 128, (1989). 451-469.
- [41] M. Santochi, G. Dini, G. Tantussi, M. Beghini. A Sensor-Integrated Tool for Cutting Force Monitoring. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 46, (1997). 49-52.
- [42] L. Vela-Martínez, J.C. Jáuregui-Correa, E. Rubio-Cerda, G. Herrera-Ruiz, A. Lozano-Guzmán. Analysis of compliance between the cutting tool and the workpiece on the stability of a turning process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, (2008). 1054-1062.



# CAPÍTULO 5

---

## INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS





## Índice

<b>5.1 Introducción .....</b>	<b>5.1</b>
<b>5.2 Evaluación y caracterización del material.....</b>	<b>5.2</b>
<b>5.3 Evaluación geométrica de la viruta con respecto a <math>V_c</math> y <math>f</math>.....</b>	<b>5.3</b>
5.3.1 Aspectos físicos de la viruta (Vista microscópica y macroscópica) .....	5.4
5.3.2 Análisis geométrico de la viruta (Vista longitudinal) .....	5.9
5.3.3 Análisis geométrico de la viruta (Vista transversal).....	5.14
<b>5.4 Evaluación de fuerzas con respecto a <math>V_c</math> y <math>f</math>.....</b>	<b>5.19</b>
<b>5.5 Evaluación del desgaste de la herramienta de corte con respecto a <math>V_c</math> y <math>f</math>.....</b>	<b>5.27</b>
5.5.1 Análisis del efecto del desgaste sobre las fuerzas de corte .....	5.32
<b>5.6 Modelos paramétricos para el mecanizado de aleaciones ligeras .....</b>	<b>5.33</b>
5.6.1 Modelos paramétricos relacionados con la geometría de la viruta.....	5.34
5.6.2 Modelos paramétricos relacionados con las fuerzas de corte.....	5.37
5.6.3 Modelos paramétricos relacionados con el desgaste de la herramienta .....	5.38
<b>5.7 Conclusiones .....</b>	<b>5.39</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>5.41</b>



## 5.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es de gran importancia, y consiste en responder a las preguntas específicas planteadas en el objeto e hipótesis de esta investigación, para lograr identificar su relación con los resultados obtenidos.

Tal y como se indicó en el primer capítulo, esta tesis doctoral tiene como objetivo principal establecer una metodológica para la caracterización y análisis de la viruta en procesos de mecanizado en seco de la aleación *UNS R56400 (Ti6Al4V)*, aleación ampliamente utilizada en la industria aeronáutica de forma hibridada, tal y como se ha manifestado en los capítulos previos. Para ello, la metodología diseñada se ha fundamentado en un análisis exhaustivo de los aspectos geométricos de la viruta en relación con las fuerzas de corte durante el mecanizado, que afectan de forma evidente al estado de la herramienta de corte y que, a su vez, tienen influencia directa con la geometría de la viruta. En este estudio se han aplicado técnicas de monitorización *ON LINE* y *OFF LINE* a fin de obtener una visión general, identificando cada variable y la interacción que existe entre ellas.

Por lo tanto, se recalca una vez más la importancia de identificar las variables resultantes de cada medición, realizada sobre fragmentos de viruta en relación con los parámetros tecnológicos:  $V_c$  y  $f$ , así como también la posible influencia con las fuerzas de corte  $F_c$  y  $F_f$  adquiridas durante el mecanizado; y, sus efectos en la herramienta de corte, mediante la medición de su desgaste prematuro bajo la determinación experimental con aproximación cercana al corte ortogonal, a través sucesivas operaciones de cilindrado sobre cara frontal de una preforma tubular, que permite simular la mecánica del corte análoga a la de un proceso de limado.

Así, los datos obtenidos de forma experimental son extraídos mediante imágenes que representan una nube de mediciones, mediante el uso de técnicas metalográficas, a fin de identificar una expresión paramétrica que permita predecir el comportamiento del material durante su mecanizado, haciendo uso de ciertos conceptos estadísticos para cada aspecto geométrico.

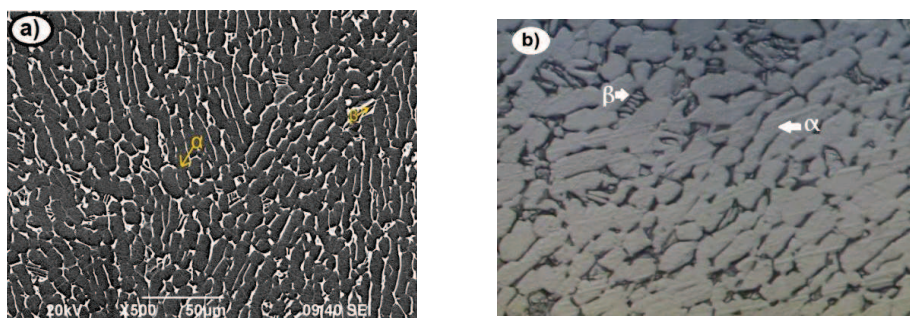
## 5.2 Evaluación y caracterización del material

En este punto se detalla la información disponible sobre el material de estudio. Se realizó la caracterización y evaluación de dicho material partiendo de una barra cilíndrica de la aleación *UNS R56400 (Ti6Al4V)*, empleando diversas técnicas de caracterización de materiales. La muestra fue evaluada mediante el uso de espectrometría de emisión óptica (OES, *Optical Emission Spectrometry*); espectrometría de energía dispersiva (EDS, *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) y microscopía óptica estereoscópica (SOM, *Stereoscopic Optical Microscopy*), tal como se observa en las Figura 5.1.



**Figura 5.1** Probeta de Ti6Al4V bajo la técnica EDS

Se observa en la Figura 5.2 la imagen de su microestructura bajo diversas técnicas metalográficas que permiten identificar las fases de la aleación. Lo cual, fue posible identificar las diversas fases de la aleación *Ti6Al4V*; en este caso la fase  $\alpha$ , con tonalidad más oscura correspondiente a la presencia de aluminio; y la fase  $\beta$ , con tonalidad clara, que indica la presencia del vanadio.



**Figura 5.2** Microestructura de la aleación Ti6Al4V: Imagen a) EDS y b) SOM

Hay que tener en cuenta que la muestra fue extraída de la pieza original. Es decir, antes de su mecanizado. Por otro lado, en la Tabla 5.1 se puede comparar la composición química en masa de la aleación obtenida con respecto los parámetros establecidos bajo las normas UNE/ISO 5832-3:2012 y UNE 38-723:1981 [1, 2], confirmándose que se encuentra dentro de los rangos permitidos.

**Tabla 5.1** Composición de la aleación Ti6Al4V (% en masa)

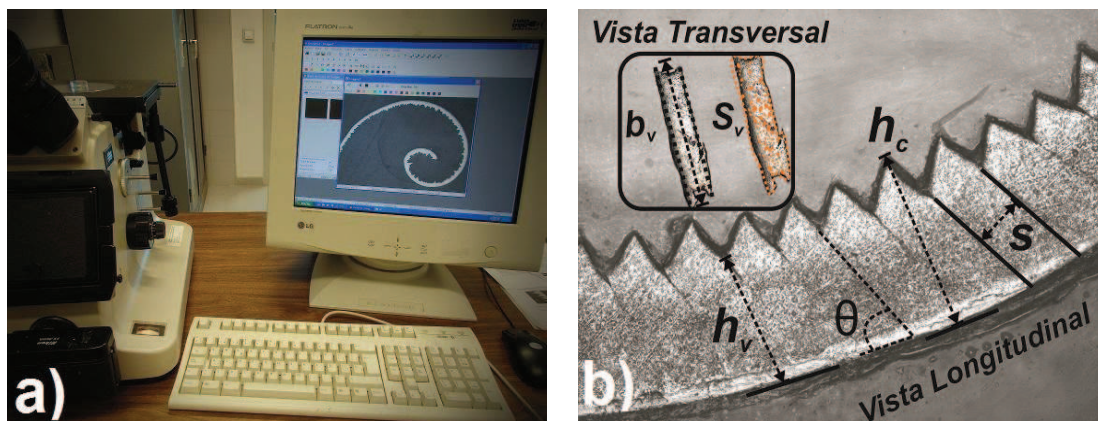
Características	C	Fe	N	O	Al	V	Ti
<b>Pieza</b>	0,08	0,164	0,05	0,05	6,29	4,07	Resto
<b>Estándar</b>	0,08	0,25	0,05	0,02	5,5-6,7	3,5-4,5	Resto

### 5.3 Evaluación geométrica de la viruta con respecto a $V_c$ y $f$

El objetivo de esta investigación se centra en identificar y evaluar la influencia que tienen ciertos parámetros tecnológicos del mecanizado; en este caso, la influencia que sobre mecanismo de formación de la viruta tiene la velocidad de corte, para un rango de avance. Para ello, se ha realizado un estudio morfológico de ciertos fragmentos de viruta bajo diversos escenarios de trabajo. Cada muestra fue preparada aplicando el procedimiento mencionado en el capítulo 4.

Posteriormente, se analizaron mediante un microscopio estereoscópico modelo *Nikon Epiphot 280* serie 460774, con un rango de amplificación de 1.5X - 400X, con cámara *Kappa ImageJ* Base modelo CF11 DSP, tarjeta PCI SC, y una fuente emisora de luz Intralux 400 marca Volpi. La captura de imagen y las mediciones se realizaron haciendo uso del software *OmniMet de Buehler*, con la plataforma comercial *ImageJ*, destinada a la medición de las magnitudes que caracterizan cada variable, ver Figura 5.3 a).

Con este objeto, se clasificaron las zonas de estudio de la viruta, que es visualizada en dos formas: transversal y longitudinal. Cada vista proporciona distintas variables de estudio, las cuales permiten realizar una caracterización del mecanizado; en este caso de la aleación *Ti6Al4V*.



**Figura 5.3** a) Equipo de microscopia SOM y b) Aspectos geométricos de la viruta

Una vez adquiridas las imágenes, se procedió a evaluar algunos aspectos geométricos. En la Figura 5.3 b), se pueden observar los parámetros geométricos transversales y longitudinales, de la viruta extraída en cada escenario de trabajo, y que se han controlado.

Los aspectos geométricos se encuentran representados por: la altura de los picos de la viruta  $h_c$ , la altura de los valles  $h_v$ , la sección longitudinal (distancia entre valles)  $S$  y el ángulo complementario  $\theta$ .



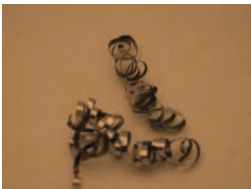



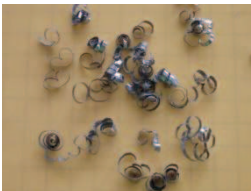













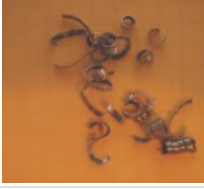



En lo que respecta a la vista longitudinal, se identifica  $S_v$  como el área de la viruta y  $b_v$  como el espesor de la misma. A partir de estos parámetros es posible calcular de forma indirecta otros parámetros geométricos de interés, como el factor de recalcado  $\zeta$  y el grado de segmentación de la viruta  $G_s$ .



5.3.1 Aspectos físicos de la viruta (Vista microscópica y macroscópica)

Para esta sección fue necesario aplicar los criterios establecidos en la norma ISO 3685:1993 [3], permitiendo evaluar la forma macroscópica y microscópica del aspecto físico de la viruta. Con este fin, se realizó un análisis comparativo con investigaciones ligadas a esta aleación, en relación a los parámetros tecnológicos para un determinado tipo de corte, relacionados ambos con la morfología de la viruta [4-6]. En la Tabla 5.2 se incluyen imágenes de la viruta de la aleación *Ti6Al4V*.

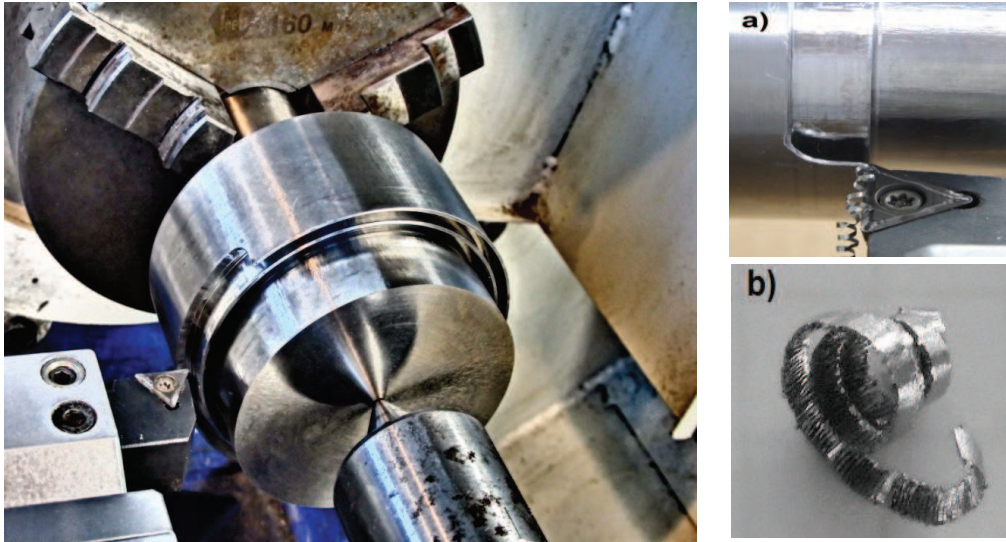
**Tabla 5.2** Imágenes de la viruta mediante SOM a 1X obtenida en función  $V_c$  con respecto a  $f$ .

$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/r]			
	0,3	0,2	0,1	0,05
30				
45				
65				
80				
100				
125				



De forma general, se puede comprobar que la viruta muestra una tipología con aspecto de diente de sierra causada por el mecanizado, Figura 5.4.

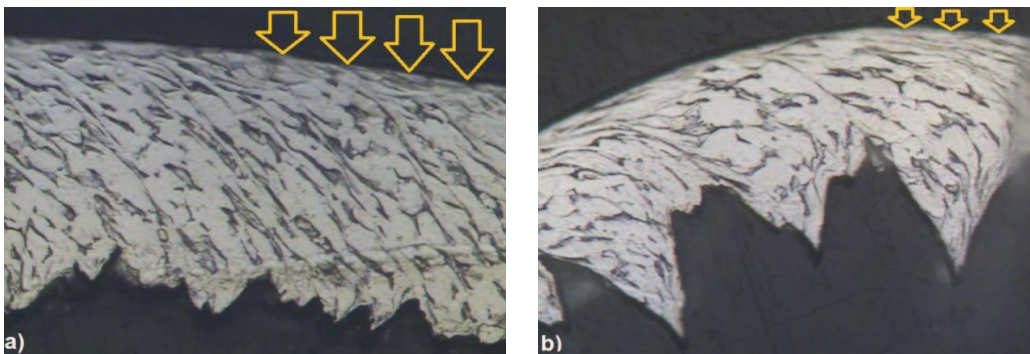
La viruta se encuentra determinada tanto por las propiedades del material de estudio, en relación con algunos parámetros tecnológicos, como por la geometría de corte empleada.



**Figura 5.4** Diseño del corte: a) Cilindrado de probeta, b) Imagen de viruta mediante SOM

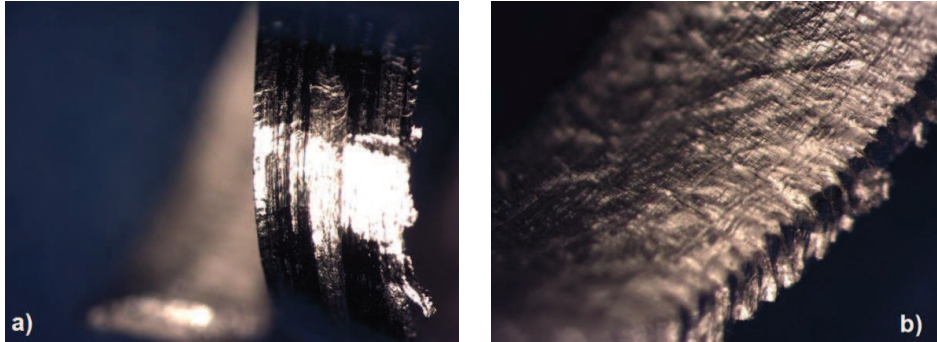
Algunos autores postulan que se es causado por un mecanismo termoplástico segmentado [7-9]. Esto se debe al efecto producido durante el corte pues la herramienta experimenta una máxima tensión en los primeros instantes del mecanizado y, posteriormente, una recuperación elástica pseudo-estable propia del material.

Al evaluar la viruta de forma microscópica se identifica cierta deformación plástica en una determinada zona superficial de la viruta, Figura 5.5, debido a las elevadas presiones que se pueden ejercer sobre el material durante el mecanizado, estando relacionada con el incremento en la  $V_c$ . Otra característica de este efecto se detecta en el tamaño de grano. En este caso, la Figura 5.5 a) muestra una ligera deformación con respecto a la Figura 5.5 b), en la que el tamaño de grano se distorsiona de forma moderada a medida que se incrementa la  $V_c$ .



**Figura 5.5** Deformación en la estructura de viruta tras el mecanizado con  $f$  de 0,05 mm/r bajo ciertos valores de  $V_c$ : a) 30 m/min, b) 125 m/min; ambas imágenes a 100X

Con respecto al aspecto físico de la viruta obtenida en cada escenario de trabajo hay una coincidencia con ciertos rasgos característicos de la aleación, tanto en su tonalidad como su aspecto físico (ligeras marcas en la superficie de ella), Figura 5.6. Se observa la presencia de dos superficies y caras distintas una de otra, a consecuencia del proceso de corte.



**Figura 5.6** Aspecto físico de la viruta: a) Cara externa y b) interna.









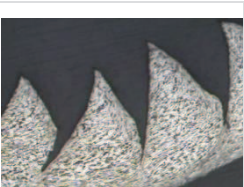
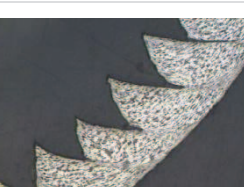
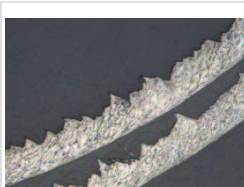

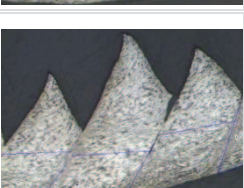
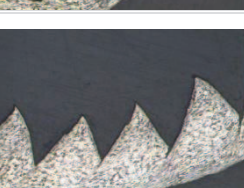
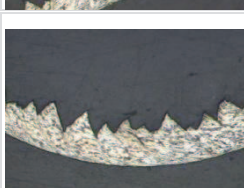
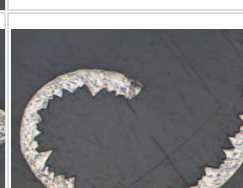
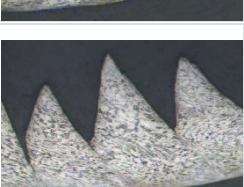
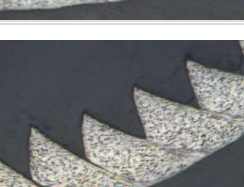
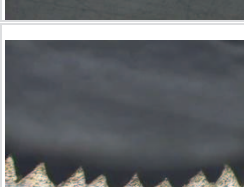
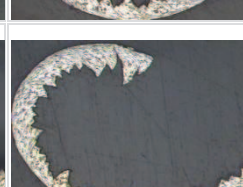
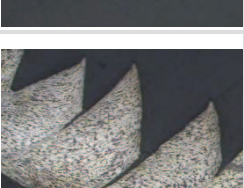
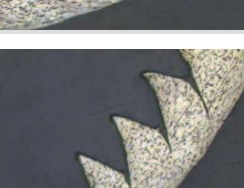

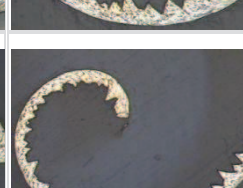
En la imagen 5.6 a) la cara externa posee un tono brillante, e incluso una ligera marca en la zona central de la viruta, debido al rozamiento o deslizamiento producido sobre la cara de la herramienta; y, además, está representada por dos superficies: una dentada por la parte exterior, y otra con superficie lisa. Se debe a que esta zona se somete a elevadas temperaturas [10].

En cambio, en la Figura 5.6 b) vemos que la cara interna original de la viruta posee un aspecto rugoso, opaco y áspero, causado por el propio proceso de corte. Por ello, se concluye de forma genérica que a medida que se incrementa la  $V_c$ , la viruta tiende a incrementar su tonalidad, y la marca de la herramienta disminuye de forma gradual. Sin embargo, a medida que se incrementa tanto  $f$  como  $V_c$ , la viruta tiende a pasar de la forma tubular segmentada a fragmentada, debido a su mayor compactación e incremento en su espesor, favoreciendo su flujo.

También se puede identificar que, para cada rango de trabajo, existe una diferencia significativa a media que se incrementa  $f$ . El comportamiento de este efecto es el resultado obtenido de las diferencias de altura entre las crestas y los valles. Todo parece indicar que los mayores esfuerzos originados a altos avances y bajas velocidades de corte dan lugar a que se supere el límite de rotura del material. Se observa un incremento en el espesor de la viruta relacionado con elevados valores de  $f$  causados por la deformación plástica, el cual conduce a un aumento de resistencia del material y, por consiguiente, a un incremento de temperatura y de las fuerzas de corte, ocasionando inestabilidad durante el mecanizado. Otro rasgo característico, al aumentar  $V_c$ , es la aparición de cierta discontinuidad en los extremos en la viruta, tendiendo a formarse incrustaciones en ambos extremos, debido a su elevado índice de deformación. La geometría de la viruta se esquematiza de forma numérica en los siguientes subapartados. Dicho resultados son obtenidos mediante la medición de ciertos fragmentos de viruta analizados de forma longitudinal, visualizados en la Tabla 5.3.



**Tabla 5.3** Vista longitudinal de la viruta a 20X en función de la  $V_c$  con respecto a  $f$

$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/r]			
	0,3	0,2	0,1	0,05
30				
45				
65				
80				
100				
125				

Se visualiza en la tabla, como se identifica la sección de la viruta que se encuentra directamente relacionada con el comportamiento del material. Y, al reducir el valor de  $f$ , la viruta decrece haciendo que esta sea más flexible y de menor tendencia a fragmentarse, dando lugar a la formación de viruta segmentada semicontinua.

A su vez, en la Tabla 5.4 se visualiza la viruta, con vista transversal, observándose un aumento gradual tanto de su área como de su espesor, ambos dependiendo del incremento de  $f$ , ocasionando una baja ductilidad y haciendo que el material desprendido sea cada vez más rígido y permita su fácil evacuación.

**Tabla 5.4** Vista trasversal de la viruta a 10X en función de la  $V_c$  y  $f$ 

$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/r]			
	0,3	0,2	0,1	0,05
30				
45				
65				
80				
100				
125				

Una vez evaluado de forma individual cada aspecto geométrico de la viruta, se realizará la interpretación de los resultados. Con la intención de obtener un panorama global, para cada variable a evaluar se determinará su media aritmética  $\mu$ , correspondiente al muestreo de los datos de cada medición, para tener una visión completa de cómo están centrados los datos, permitiendo obtener una base fiable del comportamiento del proceso de corte.

Por otro lado, se calcula la desviación estándar  $\sigma$ , puesto que será de utilidad para describir cuanto se apartan los elementos individuales de la media de la distribución.

Así mismo, se identifican los valores mínimos como máximos de cada intervalo de datos, permitiendo relacionar el rango en que se desplazan entre ellos. También es necesario para cada variable realizar un criterio de análisis mediante modelos de regresión  $R^2$  de manera que se facilite la linealidad de los datos (ya que nos permite entender la combinación de las variables). Dicha evaluación ha sido realizada mediante el uso de software comercial como *Microsoft Excel* y la plataforma de *SigmaPlot*. Por ello, es necesario calcular, para cada modelo de regresión, el coeficiente de determinación en relación con la  $V_c$  y  $f$  correspondiente a cada bloque de ensayo, utilizando las ecuaciones en relación a su tendencia. En este caso será evaluada mediante un modelo potencial.

### 5.3.2 Análisis geométrico de la viruta (Vista longitudinal)

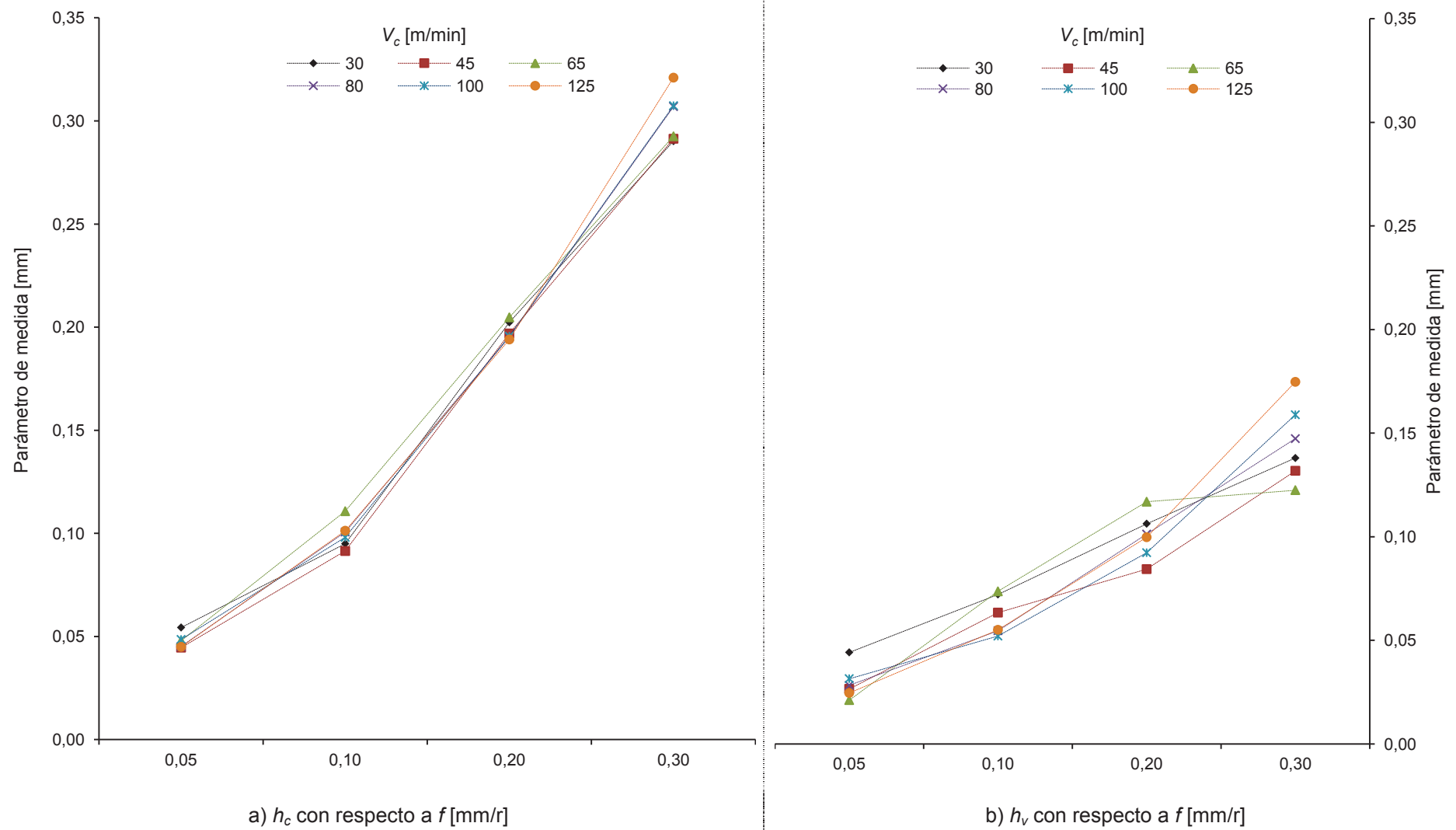
En este apartado se analizan los parámetros geométricos de la viruta en su orientación longitudinal. Se observa algunos parámetros geométricos de ella, tales como la altura de los picos  $h_c$ , la altura de los valles  $h_v$ , distancia entre valles  $S$  y el ángulo complementario  $\theta$ , que servirá para calcular el ángulo de cizalla  $\phi$ . Dichos parámetros permiten identificar el grado de influencia respecto de  $f$  y  $V_c$ .

En primer lugar, se evalúa el grado de influencia de diversos rangos de  $f$  bajo distintos valores de  $V_c$ , tal como se observa en la Figura 5.7 a) Evolución del parámetro de medida  $h_c$  frente al avance para cada  $V_c$ . En dicha figura se identifica una correlación directa entre el aumento de la altura de la cresta con el incremento de  $f$ . Sin embargo, analizando la Figura 5.7 b) se identifica el valor de  $h_v$ , que corresponde de igual forma pero a menor proporción que  $h_c$ , pues ambos se encuentran estrechamente relacionados con el espesor de la viruta.

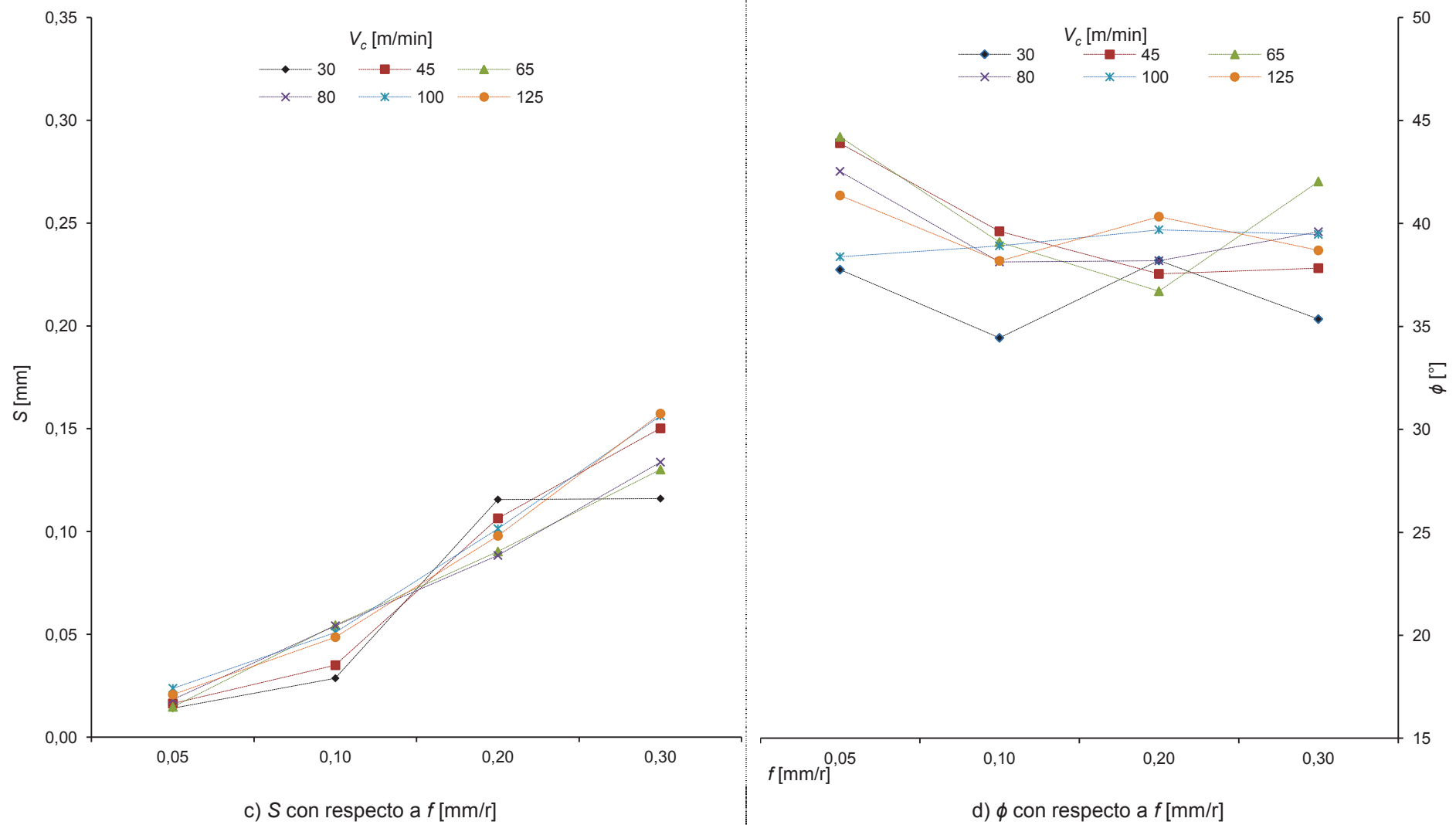
A continuación, la Figura 5.8 a) representa los valores de  $S$  en función de  $f$ , mostrando cierta dependencia a medida que incrementa. Este parámetro geométrico está relacionado con el comportamiento del material de estudio; en este caso, indica que a medida de que aumenta  $f$  conlleva mayor tensión, provocando una disminución de la resistencia del material. En cambio, evaluando la Figura 5.8 b) la tendencia en  $\phi$ , sus valores indican que tiene poca relación con  $f$ . Sin embargo, se puede comprobar que sus valores cumplen con el modelo establecido por Stabler, en lo que se refiere al corte ortogonal (su valor tiende de  $40^\circ$  a  $45^\circ$ ). Donde, se identifica que este factor está relacionado con la sección de la viruta; es decir, si el ángulo es menor, el área de la viruta aumenta y, por ello, se precisa mayor esfuerzo para su evacuación. Es importante indicar que fue necesario aplicar los conceptos vistos en el punto 2.7.4, lo cual permitió conocer el ángulo de cillazamiento representado gráficamente.

Ahora bien, analizando cada gráfico en función de la  $V_c$ , se observa que los parámetros geométricos de la viruta mencionados con anterioridad, Figura 5.9 y Figura 5.10, tienden a la linealidad para todos los casos, indicando una baja relación con respecto a  $V_c$ , con la excepción de la Figura 5.10 b), ya que en ella se aprecia que a mayores valores de  $V_c$  el ángulo de cizalla se estabiliza de forma constante.



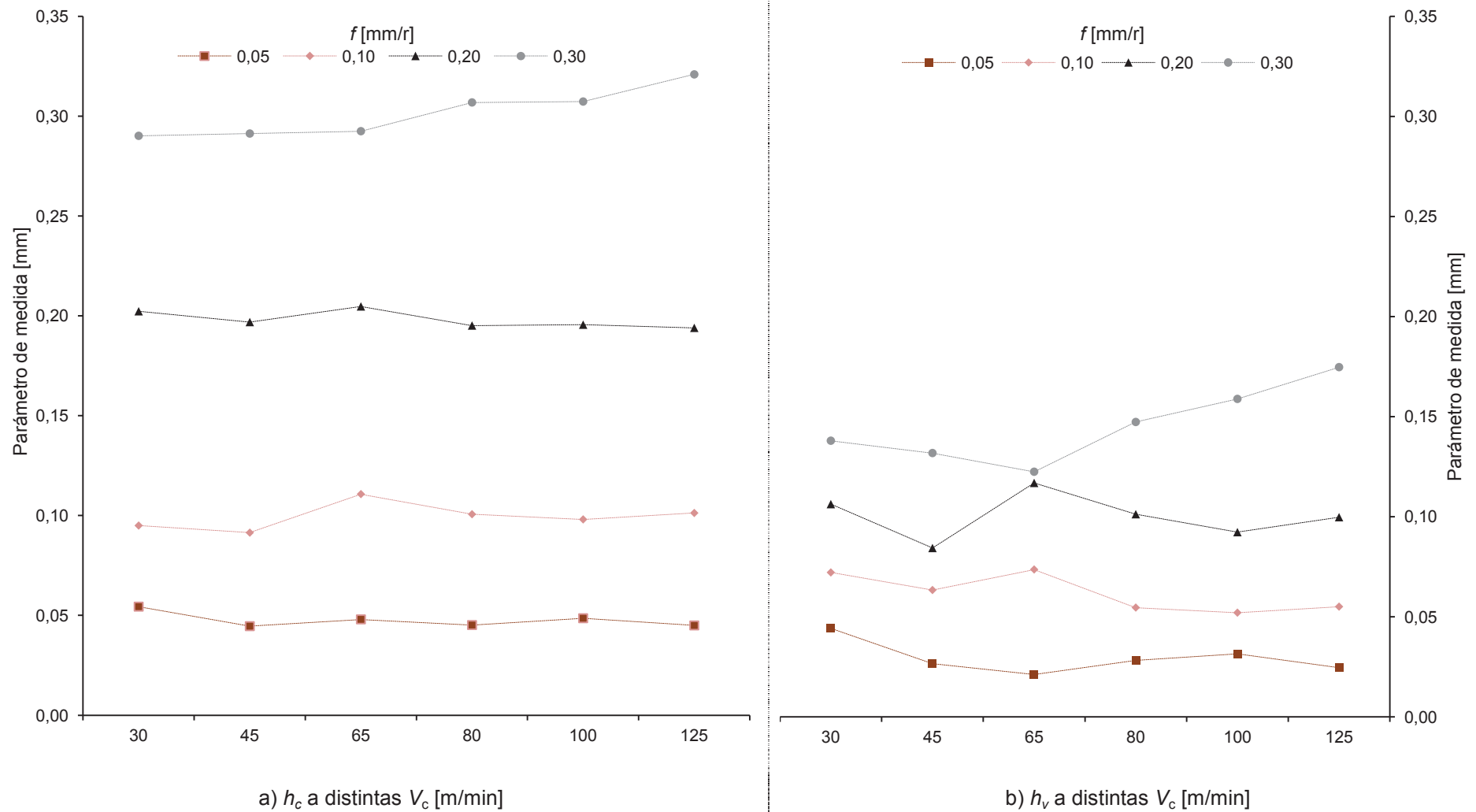


**Figura 5.7** Evolución geométrica de la viruta: a)  $h_c$  y b)  $h_v$  a diversos rangos de  $f$  [mm/r] con respecto a distintas  $V_c$  [m/min].

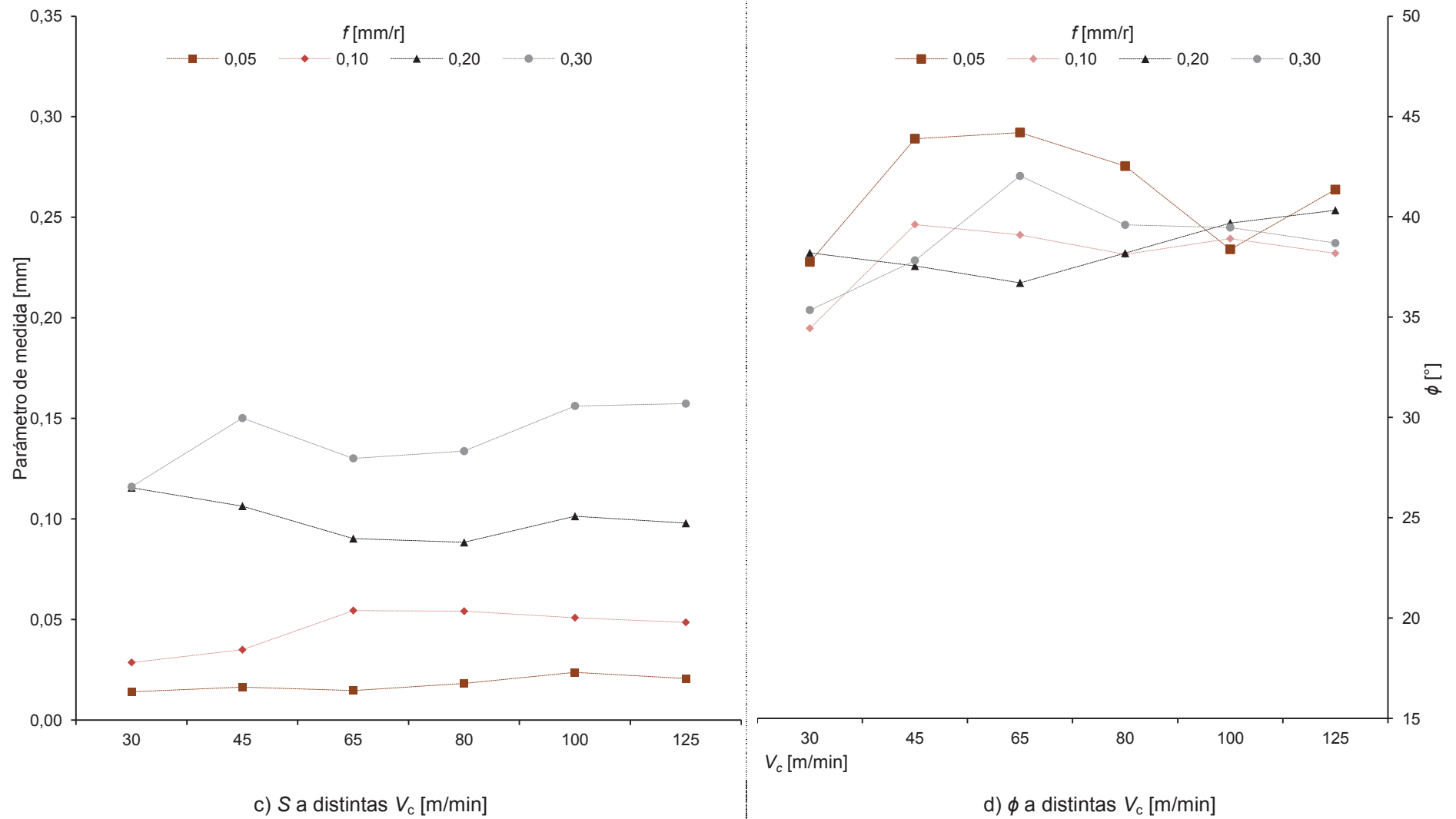


**Figura 5.8** Evolución geométrica de la viruta: a)  $S$  y b)  $\phi$  a diversos rangos de  $f$  [mm/r] con respecto a distintas  $V_c$  [m/min].





**Figura 5.9** Evolución geométrica de la viruta: a)  $h_c$  y b)  $h_v$  a distintas  $V_c$  [m/min] con respecto a diversos rangos de  $f$  [mm/r].



**Figura 5.10** Evolución geométrica de la viruta: a)  $S$  y b)  $\phi$  a distintas  $V_c$  [m/min] con respecto a diversos rangos de  $f$  [mm/r].

### 5.3.3 Análisis geométrico de la viruta (Vista transversal)

Cabe indicar que al evaluar la viruta de forma transversal se pueden identificar dos parámetros geométricos indirectos: espesor de viruta  $b_v$  y área de viruta  $S_v$ , así como otros dos indirectos: tales como el factor de recalcado  $\zeta$  y el grado de segmentación  $G_s$ . En la Figura 5.11 y en la Figura 5.12 se muestran cada uno de ellos en función de  $f$  bajo diversos valores de  $V_c$ .

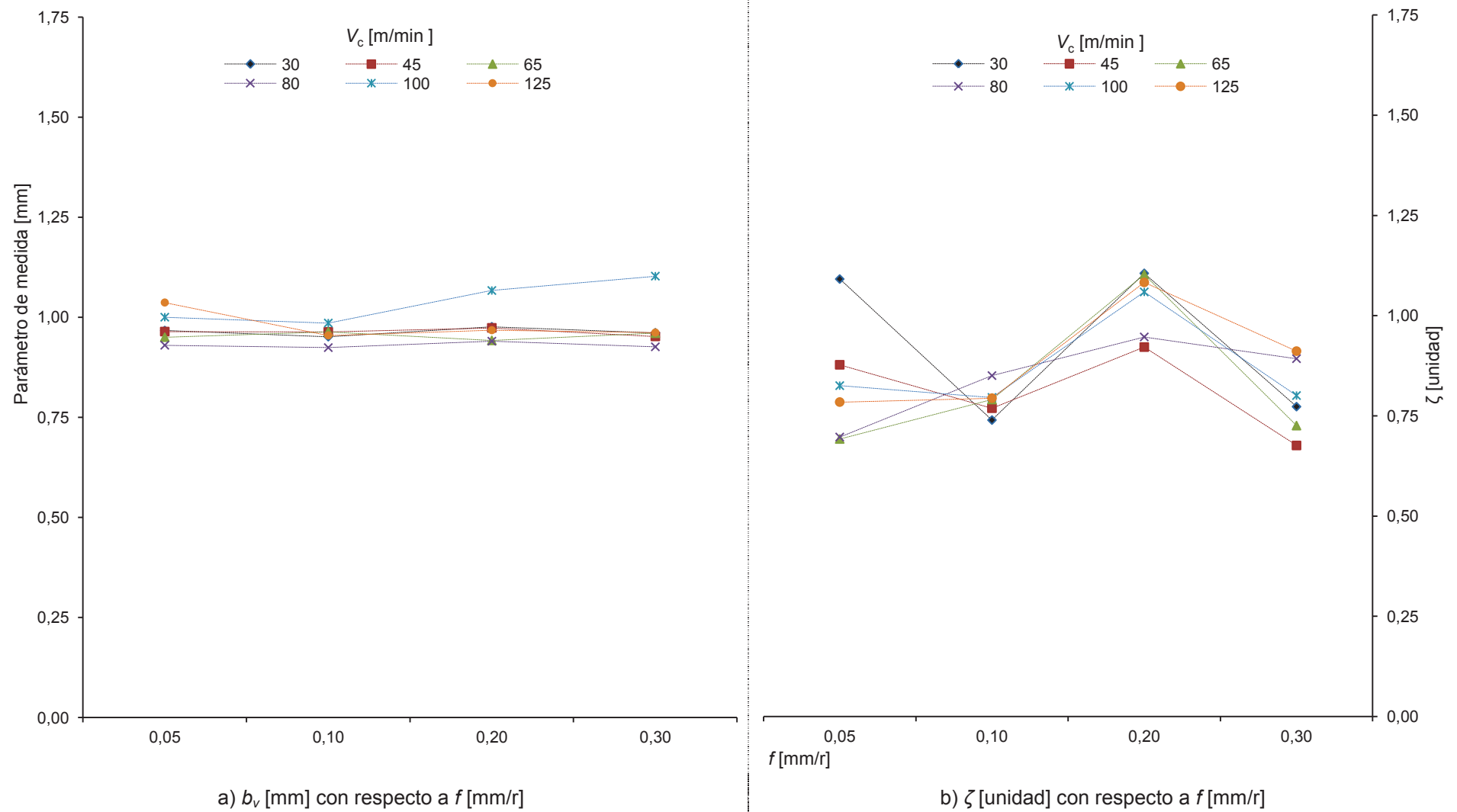
Al comparar los gráficos, en la Figura 5.11 a) se observa que el parámetro  $b_v$ , cuyo valor está determinado por  $ap$  (ancho de pared mecanizada establecida en el diseño del corte o bien, la profundidad de corte) presenta una baja influencia respecto a  $f$  y su valor tiende a acercarse a 1 mm (valor establecido previamente en la probeta de trabajo).

En cambio, si se representa el parámetro  $S_v$ , Figura 5.11 b), se identifica la evolución del factor de recalcado  $\zeta$ . Es importante indicar que fue necesario aplicar los conceptos visto en el punto 2.7.7, lo cual permitió conocer el valor de  $\zeta$ . Dicho valor es el cociente de la sección transversal de la viruta antes de ser cortada ( $S_o$ ) y después del corte ( $S_v$ ), mencionado en el capítulo 2. Los resultados muestran una tendencia hacia un valor unitario, lo cual indica que cumple con el criterio de corte ortogonal.

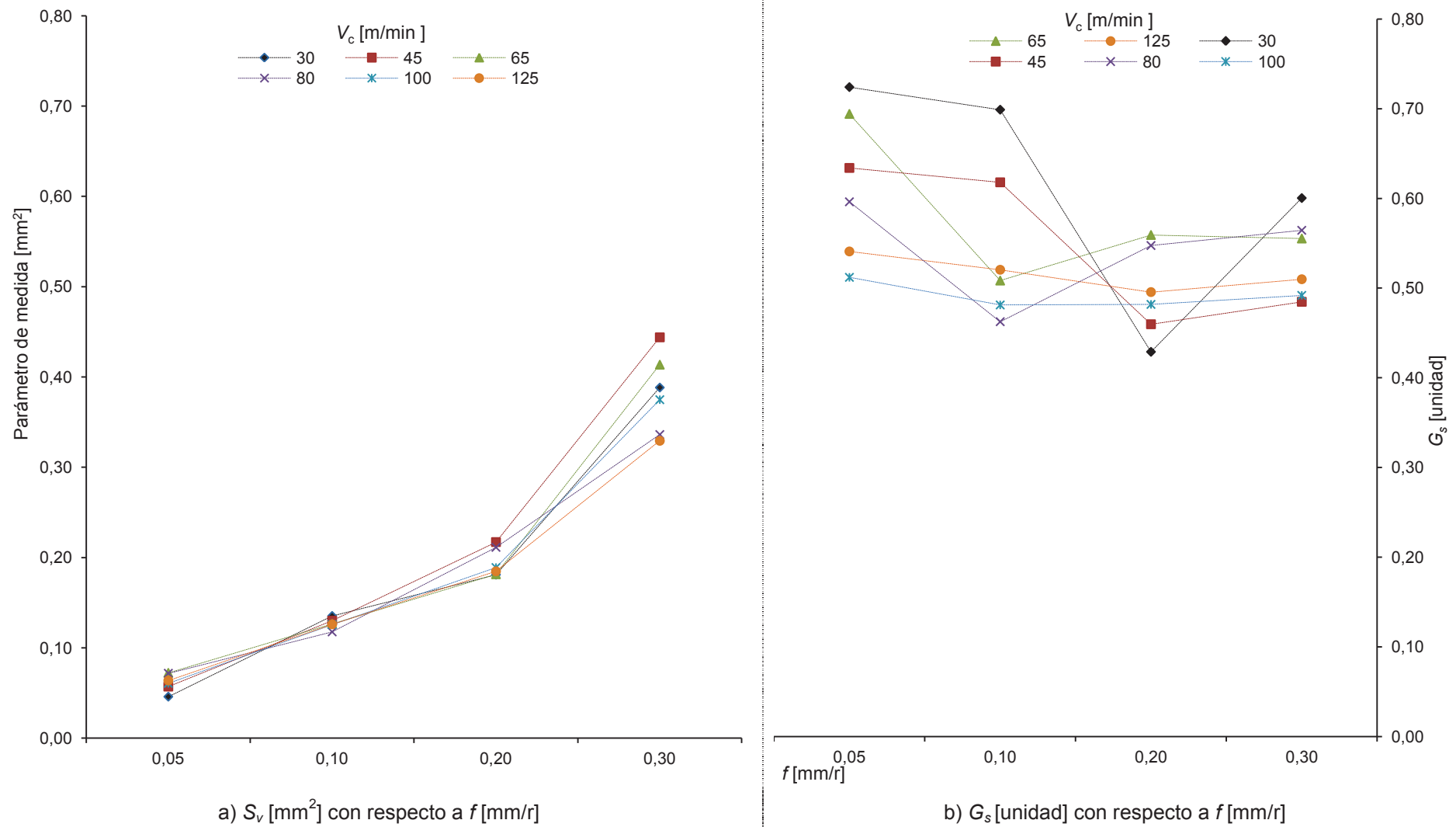
Sin embargo, es conveniente considerar el valor  $S_v$ , reflejado en la Figura 5.12 a), donde se detecta una fuerte dependencia con  $f$  con tendencia homogénea de forma lineal. La Figura 5.12 b), representada por el parámetro  $G_s$ , muestra la variación de la conductividad térmica de la aleación. Por lo tanto, al incrementar de  $f$ , la conductividad es mayor y su valor tiende a aproximarse a la unidad. Para conocer el valor representativo de  $G_s$  fue necesario recurrir a la sección 2.7.8, siendo posteriormente representado de forma gráfica.

En cambio, si se representan los parámetros geométricos mencionados con anterioridad frente a  $V_c$ , se puede observar, tanto en la Figura 5.13 como en la Figura 5.14, una baja influencia con respecto a dicho parámetro tecnológico.

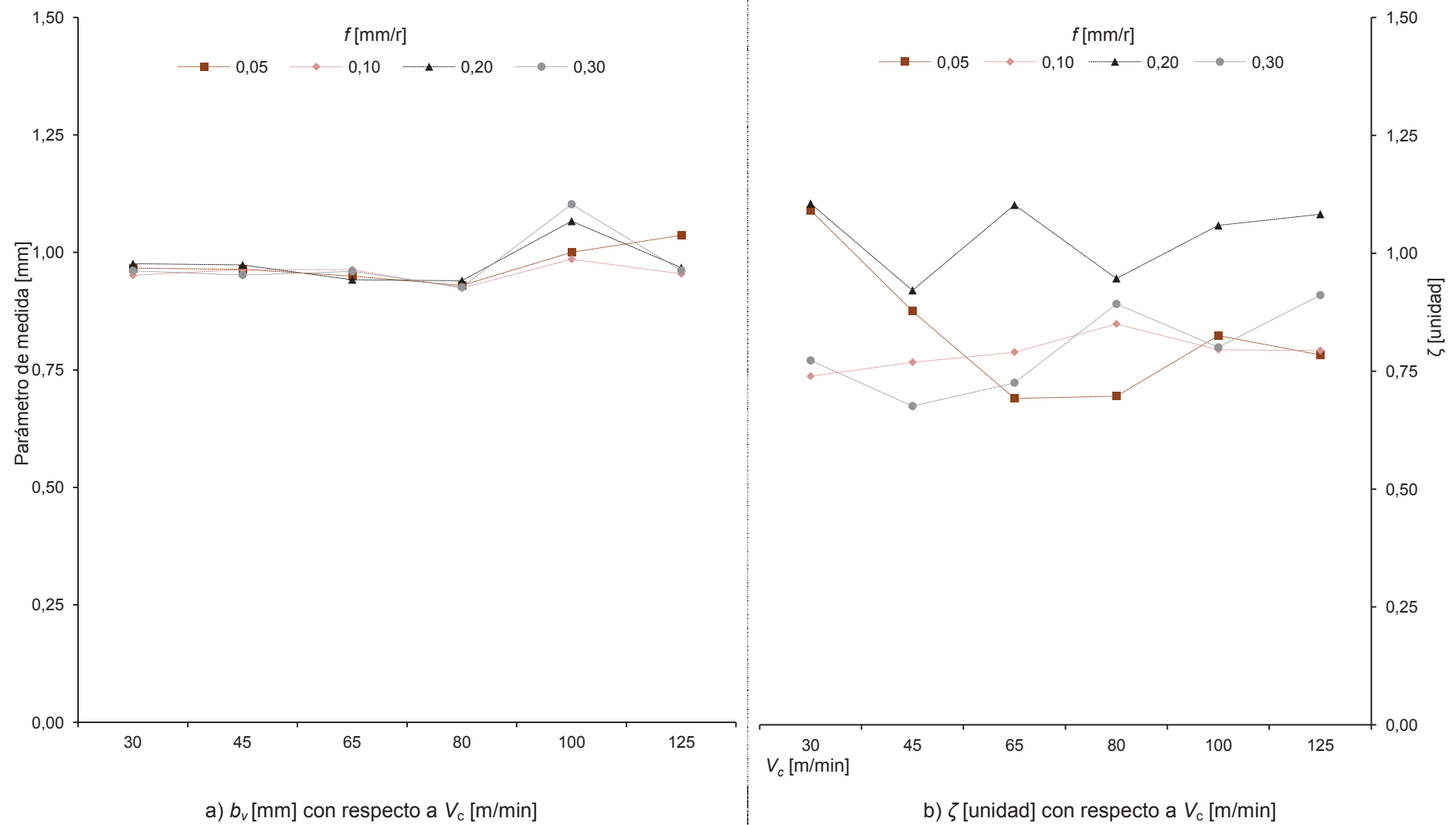
A excepción del parámetro  $G_s$ , visualizado en la Figura 5.14 b), observándose que, a medida que incrementa  $V_c$ , el comportamiento de la viruta va cambiando. Es decir, a bajas velocidades tiende a ser semicontinua, mientras que a media de que se incrementa su valor pasa a ser viruta segmentada fragmentada, lo cual coincide con los resultados de investigadores como G. Sutter [8]. Su estudio está relacionado con el mecanizado de la aleación *Ti6Al4V* y se centra en evaluar el mecanismo de formación de la viruta, durante el mecanizado a altas velocidades de corte, con corte ortogonal. Esta Figura muestra la influencia de los referidos parámetros de corte con respecto a la tendencia morfológica de la viruta a través de sus aspectos geométricos.



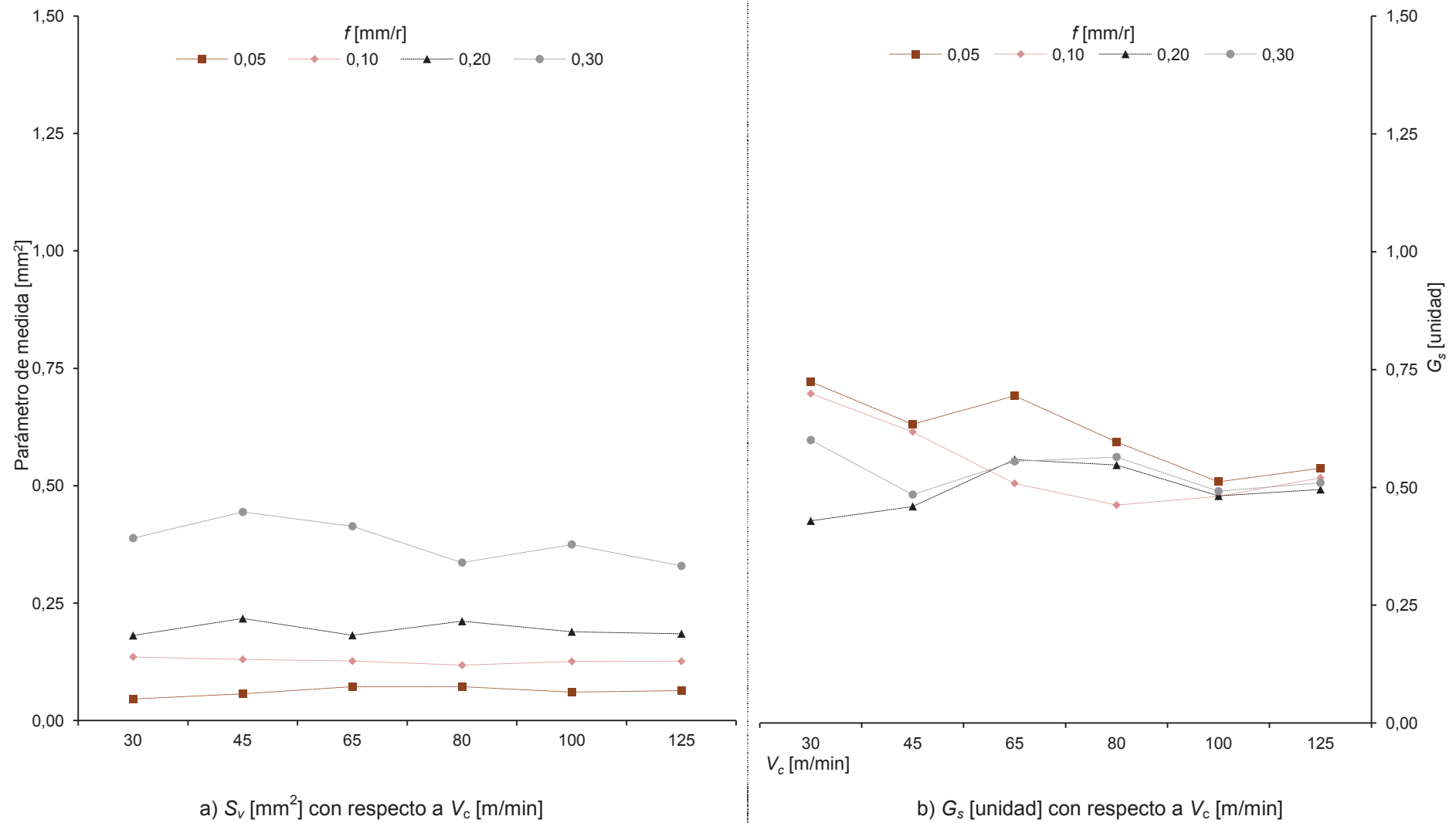
**Figura 5.11** Evolución geométrica de la viruta: a)  $b_v$  y b)  $\zeta$  a diversos rangos de  $f$  [mm/r] con respecto a distintas  $V_c$  [m/min].



**Figura 5.12** Evolución geométrica de la viruta: a)  $S_v$  y b)  $G_s$  a diversos rangos de  $f$  [mm/r] con respecto a distintas  $V_c$  [m/min].



**Figura 5.13** Evolución geométrica de la viruta: a)  $b_v$  y b)  $\zeta$  a distinta  $V_c$  [m/min] con respecto a diversos rangos de  $f$  [mm/r].



**Figura 5.14** Evolución geométrica de la viruta: a)  $S_v$  y b)  $G_s$  a distinta  $V_c$  [m/min] con respecto a diversos rangos de  $f$  [mm/r].

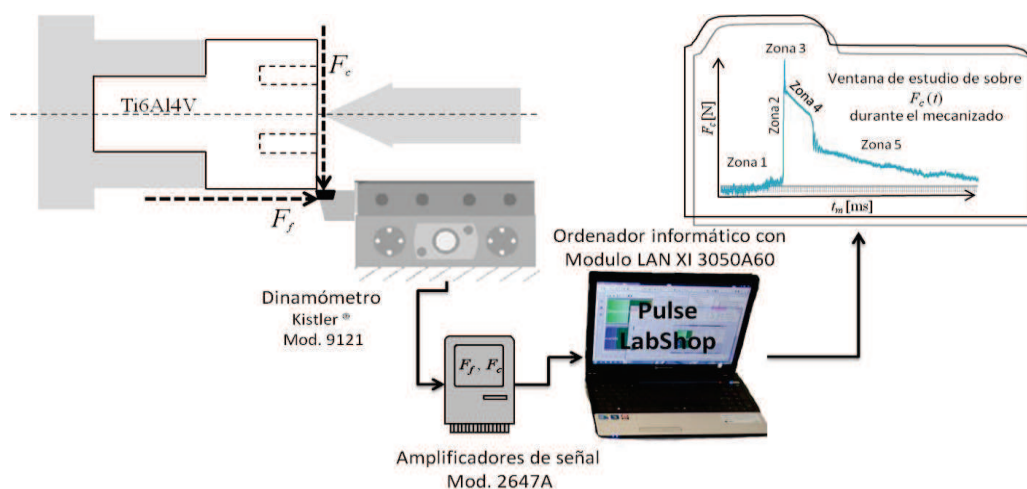


Para finalizar esta sección se hace referencia a investigaciones con temáticas cercanas a esta tesis. En temas relacionados con la geometría de la viruta se destacan los trabajos realizados por M. D. Morehead [11], relativos al mecanizado de acero al carbón (SAE 52100). En ellos identifica los efectos causados en la herramienta de corte; en este caso refiriéndose al desgaste generado durante el mecanizado y la influencia de  $V_c$  y  $f$  en la morfología de la viruta, mostrando sus resultados experimentales una gran relación con los obtenidos en esta tesis. Otros estudios de gran interés fueron elaborados por M. Calamaz [12] y por R. Li [13], quienes demostraron mediante el uso de técnicas de simulación (elementos finitos tanto en 3D como 2D, aplicando el modelo de Johnson Cook) el mecanismo de formación de la viruta durante el mecanizado de la aleación *Ti6Al4V*. Sus investigaciones han puesto de manifiesto que la deformación plástica sufrida en el corte se encuentra asociada con la velocidad y la fuerza de avance, proporcionando similares límites de trabajos propuestos en este estudio, es decir, se recomienda mecanizar por debajo de  $V_c$  con valor de 60 m/min con  $f$  con valor de 0,1 mm.

#### 5.4 Evaluación de fuerzas con respecto a $V_c$ y $f$

Conviene recordar que durante la ejecución de ensayos fue necesario capturar señales eléctricas emitidas mediante un dinamómetro, a fin de adquirir de forma experimental las fuerzas de corte generadas durante el contacto establecido entre la herramienta y la zona de corte en la pieza, durante su mecanizado. El resultado serviría para mostrar el rango elástico que sufre el material.

El procedimiento completo se encuentra explicado en el Anexo III (Procedimiento para captura de señales) de esta tesis, donde se detalla el propósito del ensayo, el uso y puesta a punto para la captura de las señales de fuerzas. En otro orden de cosas, en la Figura 5.15 se observa de forma específica el esquema de trabajo que fue establecido para obtener las fuerzas que intervienen. Razón por la que cabe puntualizar que se analizan los resultados adquiridos en base a la geometría de corte para la que fue diseñada (corte ortogonal), permitiendo identificar las fuerzas que actúan al momento de mecanizar la pared de la probeta diseñada.

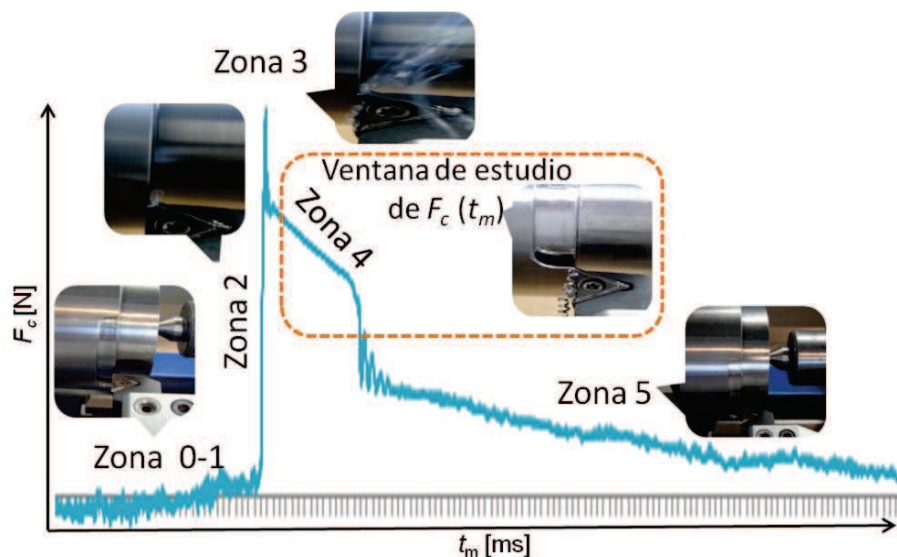


**Figura 5.15** Esquema de trabajo para adquisición de fuerzas.

La fuerza en la dirección del eje Y, conocida como fuerza radial al corte, es nula debido a que no existe movimiento de avance en la herramienta de corte. Por otro lado, los resultados obtenidos de  $F_c$ , en el eje Z, y  $F_f$ , en el eje X, están representados de forma gráfica con respecto a todos los escenarios de trabajo establecidos en el punto 4.4.1.2. Se puede observar una evolución temporal de las fuerzas ejercidas en la primera etapa del mecanizado, conocida como régimen transitorio, permitiendo identificar una amplitud extrema de forma instantánea, causada por el impacto inicial de la pieza con la herramienta de corte.

Una vez clarificado lo anterior, se procede a determinar los datos teóricos de entrada y el tiempo empleado por el torno en su arranque hasta lograr un régimen estable bajo las diversas velocidades de giro. Este valor recibe el nombre de tiempo de desahogo  $t_d$  y permite conocer la posición angular  $\varphi$  necesaria para garantizar una  $V_c$  constante.

Otros parámetros de gran importancia son la frecuencia y el periodo empleado en mecanizar una vuelta de corte. La realización de estos cálculos permite conocer el rango de valores en los que pueden variar los ensayos durante el tiempo de corte. Dicho cálculo se visualiza en el Anexo VI (Hoja de cálculo de parámetros de entrada). Una vez finalizados los ensayos y comprobados sus valores, se da inicio al proceso de interpretación de los resultados obtenidos. Se ha considerado realizar 10 ensayos para cada una de las condiciones de trabajo indicadas en el capítulo 4. Para ello, es conveniente considerar 5 zonas en la evolución de las fuerza de corte (Figura 5.16), con el propósito de identificar en detalle el comportamiento del proceso de mecanizado, tal y como se indicó en el apartado 4.8.3.



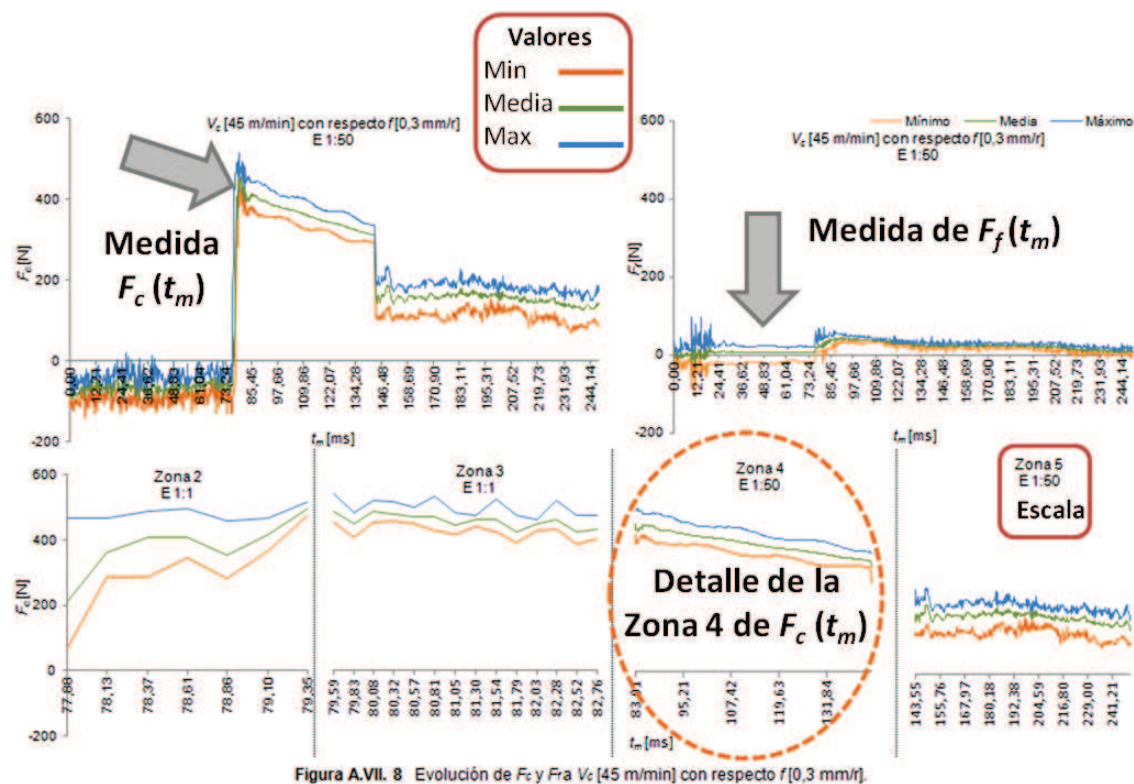
**Figura 5.16** Ejemplo sobre la ventana de estudio relacionada con  $F_c(t_m)$ .

Donde, se identifica que la zona 1 se corresponde con el tiempo que recorre la pieza dentro de la sección establecida como desahogo  $t_d$ , durante los primeros instantes de corte (periodo transitorio); la zona 2 representa el intervalo de tiempo  $t_2$  que muestra los primeros cambios significativos de  $F_c$ , hasta llegar al valor de la fuerza máxima; la zona 3 se corresponde con la relajación de las fuerzas transitorias hasta un estado cuasi-estable  $t_3$ ; la zona 4 acota el intervalo de fuerza cuasi-estable hasta llegar unos

instantes antes de finalizar el corte,  $t_4$ . Finalmente, la zona 5 representa la disminución del contacto herramienta-pieza y los últimos momentos del mecanizado  $t_5$ . En el desarrollo de esta investigación se ha analizado la zona 4, eliminando el efecto de la entrada y salida de la herramienta de corte.

En todos los ensayos se ha empleado el promedio aritmético, así como los valores tanto mínimos como máximos del resultado de un determinado bloque de medidas respecto al intervalo de tiempo, tal como se representa en la Figura 5.17. Al comparar los resultados, y sus tendencias de manera general se logra apreciar una evolución constante de  $F_c$  para todas las zonas de estudio con respecto al rango de  $f$ , lo cual era de esperar debido a que durante los primeros instantes del mecanizado se ejerce sobre la herramienta el mayor valor de fuerza, creando una ligera fluctuación en el valor medio.

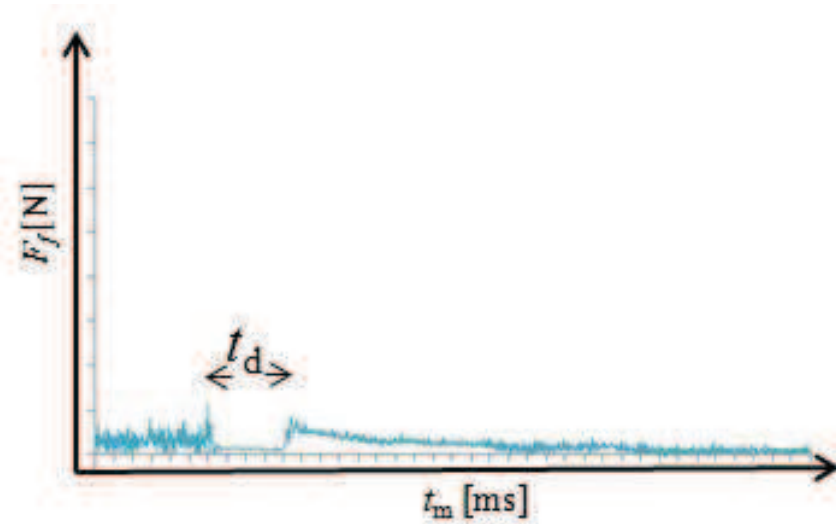
Posteriormente, en sus últimos instantes, disminuye de forma progresiva hasta finalizar el corte. En este mismo gráfico se muestra, en la parte inferior, el detalle de cada zona y su escala correspondiente según el intervalo de tiempo transcurrido en el corte. Por otro lado, se observa que la tendencia de  $F_f$  es mucho menor en comparación con el valor obtenido en  $F_c$ . No obstante, es representada de forma gráfica, tal como se muestra en la parte superior derecha del ejemplo, a fin de tener una representación global de cada intervalo de trabajo, con las mismas condiciones de corte en  $F_c$  y en  $F_f$ .



**Figura 5.17** Ejemplo sobre la medida obtenida en  $F_c$  y  $F_f(t_m)$  con respecto a cada intervalo de trabajo ( $f$  y  $V_c$ ).

Se resume, a continuación, el estudio genérico de los datos adquiridos en relación al proceso evolutivo de la  $F_c$  para distintos valores de  $f$ .

En la Figura 5.18 se observa que la  $F_f$  es inferior a  $F_c$  (equivalente a un 10% respecto al valor medio de  $F_c$ ), lo que indica que la pieza ejerce mayor presión en la herramienta durante el impacto. En  $F_f$  se muestra el rozamiento de la herramienta durante el corte, causado por el contacto con la viruta, por lo que su valor es muy inferior.



**Figura 5.18** Ejemplo sobre la ventana de estudio relacionada con  $F_f(t_m)$ .

Sobre las bases expuestas, se procede con la interpretación de los datos adquiridos en cada escenario de corte, a distintos rangos de  $V_c$ , en función de los valores de  $f$ . Una vez identificada cada una de sus fuerzas, se representa, de manera resumida, el valor promedio correspondiente a la zona de estudio (fase 4, cuasi-estable), en el caso de  $F_c$ . Se finalizan con el valor promedio global de  $F_f$  durante el tiempo total del mecanizado, Tabla 5.5, que confirma que dichos valores se encuentran dentro del rango establecido en ciertas investigaciones similares a esta tesis, a pesar del corto tiempo de mecanizado [14-16].

**Tabla 5.5** Resumen de fuerzas  $F_c$  y  $F_f$  para distintos rangos de  $V_c$  en función de diferentes valores de  $f$

$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/r]							
	$F_c$ [N]				$F_f$ [N]			
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,05	0,1	0,2	0,3
<b>30</b>	208,94	255,75	294,23	472,05	48,04	20	31,53	15,12
<b>45</b>	165,61	186,18	298,61	358,63	14,23	17,57	11,91	23,54
<b>65</b>	158,90	209,92	309,29	350,54	19,73	21,96	26,81	21,56
<b>80</b>	132,52	184,71	198,02	226,58	14,54	13,46	35,24	41,79
<b>100</b>	95,51	153,92	211,65	283,99	32,88	54,37	52,72	16,42
<b>125</b>	70,05	75,93	154,44	244,68	22,70	23,25	31,73	12,64

Tal como se ilustra en la tabla, correspondiente al comportamiento general de los casos de estudio equivalentes a 240 cortes (10 repeticiones para cada una de las 6  $V_c$  en sus 4 combinaciones con respecto a  $f$ ). Se observa la tendencia en  $F_c$ , para los distintos valores de  $f$ , pasa de un valor mínimo del 13%, para  $f$  bajos, hasta llegar a un

30%, en el caso de  $f$  superiores a 0,2 mm/r (el % es calculado con respecto a la media total de  $F_c$  adquiridos en ciento rango de  $f$  y comparando con el siguiente rango de  $f$ ). Esto indica que  $f$  es una variable que influye en el comportamiento de  $F_c$ .

Por último, analizando la fuerza en el eje axial, se observa que  $F_f$  sigue una tendencia aproximada que se corresponde con un 10% a un 20% respecto al valor promedio de  $F_c$ , indicando que la pieza ejerce mayor presión en la herramienta durante el impacto, y que  $F_f$  sólo se ve afectada por la fricción causada por el roce de la viruta en la cara de incidencia de la herramienta. Por ello, conviene evaluar de forma independiente la influencia del parámetro tecnológico  $f$  respecto a la obtención de fuerzas registradas durante el corte.

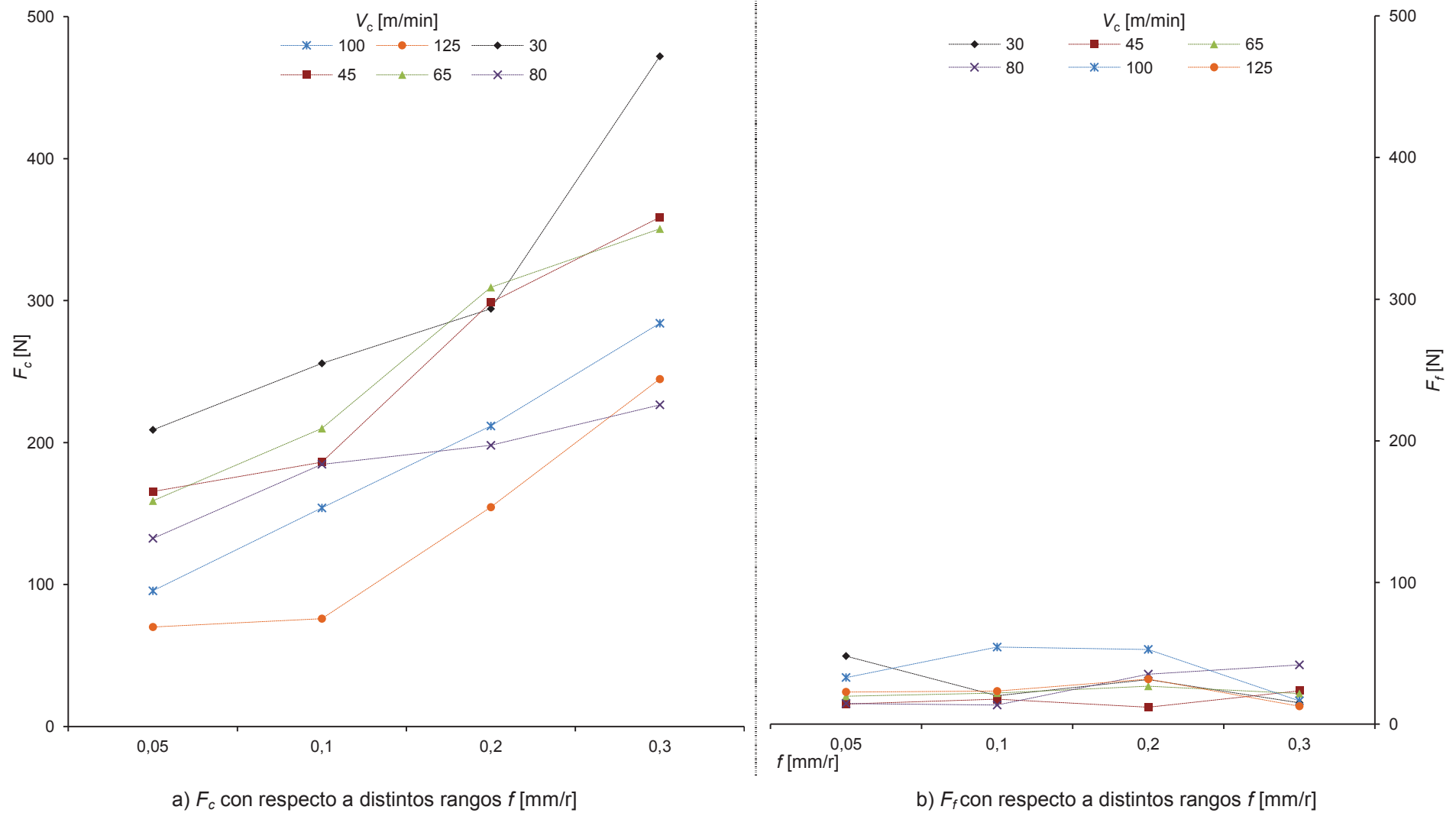
Así, en la Figura 5.19 se observa la tendencia global de ambas fuerzas, a distintos rangos de  $f$  para los diferentes valores de  $V_c$ . En primera instancia, se aprecia un incremento moderado de  $F_c$ , influenciado por el parámetro  $f$ , ocasionando una viruta de mayor espesor, lo que está relacionado con su sección transversal  $S_v$ , provocando mayor tendencia a su fragmentación y, a su vez, un posible desgaste o fractura en la cara de incidencia de la herramienta de corte.

Sobre lo anterior, cabe destacar ciertos ensayos experimentales que evalúan la influencia de  $f$  durante el mecanizado en seco de la aleación *Ti6Al4V*, sobresaliendo los estudios de S. Sun [14], quien asocia las dinámicas de las fuerzas de corte obtenidas bajo diversos valores de  $V_c$  y  $f$ . En dichos ensayos se concluye que, a menores valores de  $f$ , la viruta fluye lentamente sobre la cara de la herramienta, provocando mayor vibración durante el corte y, por ello, un incremento en la fuerza de corte. Este análisis coincide con los resultados obtenidos de forma experimental en esta tesis, pues la combinación a altos valores de  $V_c$  y  $f$  requieren menor fuerza de corte, lo que es debido al bajo módulo de elasticidad que muestra dicha aleación y al alto rango de temperatura generado durante el corte.

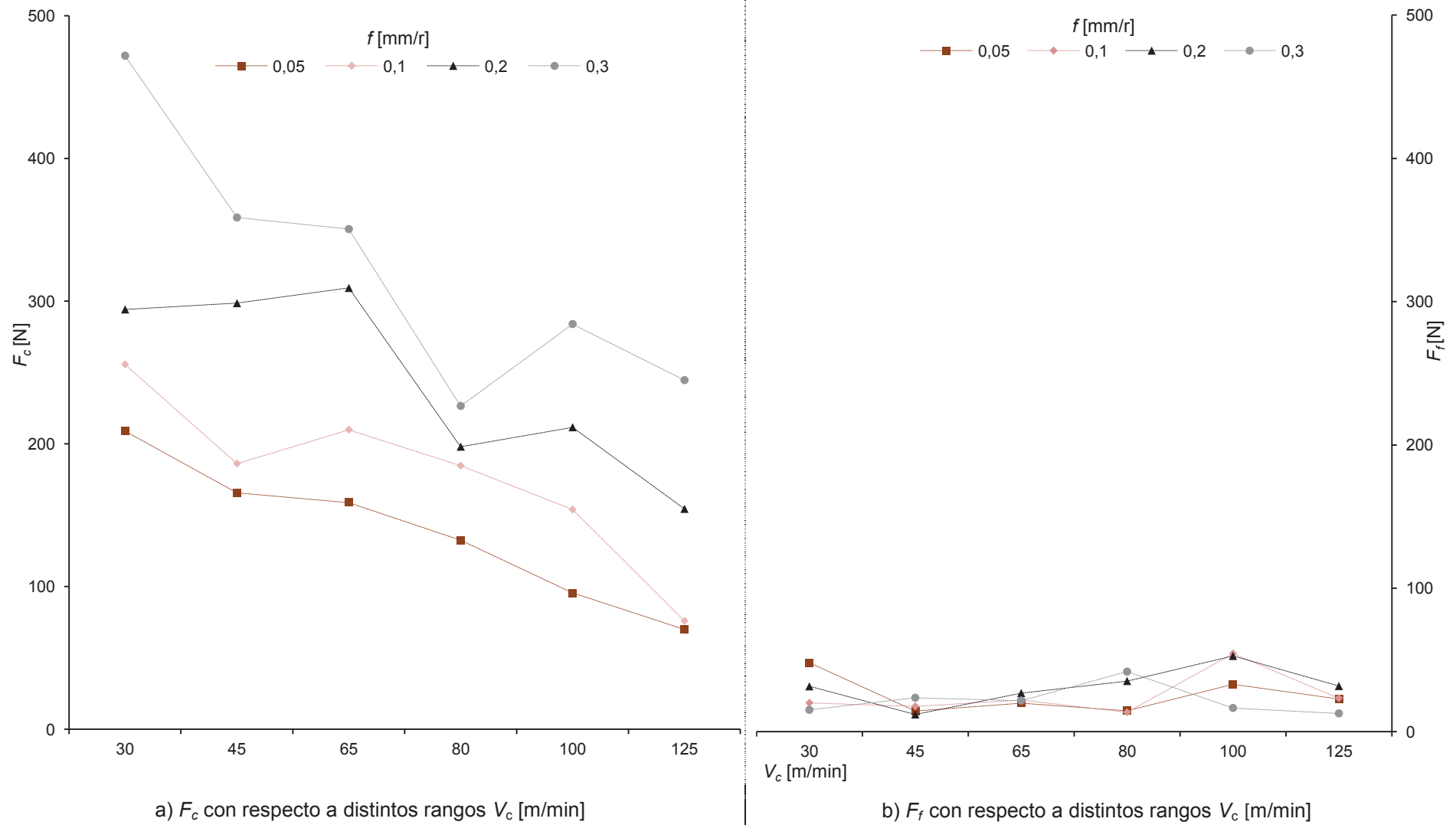
No obstante, evaluando la influencia de la  $V_c$  en ambas fuerzas, tal como se observa en la Figura 5.20 a), a mayor  $V_c$  se reduce de forma considerable la  $F_c$ , debido a que la temperatura de corte aumenta  $V_c$ , reduciendo la resistencia del material (ablandamiento térmico), y, por ello, menor es la fuerza en la herramienta. Para este análisis se considera la propuesta de Oxley, quien evaluó el efecto de la velocidad de corte mediante la velocidad de deformación. Los resultados experimentales obtenidos para el presente estudio coinciden tanto con la teoría de Oxley como con la de Johnson Cook, indicados por algunos estudios que hacen hincapié de dichos modelos [15, 17, 18]. Ambos muestran una disminución de la fuerza de corte con respecto al incremento de la velocidad de corte, causada por el aumento del ángulo de cizalladura, que a su vez provocan una disminución en su espesor y, en consecuencia, decrece el valor de su fuerza de corte. En cambio, a menor valor de  $V_c$ , la tendencia de la fuerza será mayor debido a la formación de un posible *BUE* (*Built-Up Edge*) en la herramienta de corte.

Mientras que la tendencia con respecto a  $F_f$ , de acuerdo a la Figura 5.19 b) y Figura 5.20 b), muestra una mínima afectación con respecto a  $f$  como  $V_c$ .





**Figura 5.19** Evolución de las fuerzas: a)  $F_c$  y b)  $F_r$  a distintos rangos de  $f$  [mm/r] con respecto a diversos valores de  $V_c$  [m/min].



**Figura 5.20** Evolución de las fuerzas: a)  $F_c$  y b)  $F_f$  a diversos valores de  $V_c$  [m/min] con respecto a distintos rangos de  $f$  [mm/r].



Las evidencias anteriores se encuentran resumidas en la Tabla 5.6 y de forma gráfica en el Anexo VII (Gráficas representativas de fuerzas de corte), la cual permite identificar la ubicación de cada escenario de trabajo (respecto a diversos rangos de  $f$  como  $V_c$ ). En ambos casos, se describe la tendencia  $F_c$ , incluyendo las zonas de estudio de dicha fuerza y la tendencia con respecto  $F_f$ .

**Tabla 5.6** Resumen de tendencias  $F_c$  y  $F_f$  a distintos rangos de  $V_c$  en función de diversos valores de  $f$

$V_c$ [m/min]	$F_c$ y $F_f$ [N]			
	0,05	0,1	0,2	0,3
30	Figura A.VII.1	Figura A.VII.2	Figura A.VII.3	Figura A.VII.4
45	Figura A.VII.5	Figura A.VII.6	Figura A.VII.7	Figura A.VII.8
65	Figura A.VII.9	Figura A.VII.10	Figura A.VII.11	Figura A.VII.12
80	Figura A.VII.13	Figura A.VII.14	Figura A.VII.15	Figura A.VII.16
100	Figura A.VII.17	Figura A.VII.18	Figura A.VII.19	Figura A.VII.20
125	Figura A.VII.21	Figura A.VII.22	Figura A.VII.23	Figura A.VII.24

En lo que corresponde al tiempo de mecanizado, previamente se indicó que el Anexo VI (Hoja de cálculo de parámetros de entrada) tiene como objetivo orientar, de forma general, los cálculos teóricos correspondientes a las condiciones de los ensayos. Posteriormente se comparan los valores obtenidos experimentalmente, tal como se aprecia en la Tabla 5.7.

**Tabla 5.7** Resumen de tiempo de mecanizado a distintos rangos de  $V_c$  en función de diversos valores de  $f$



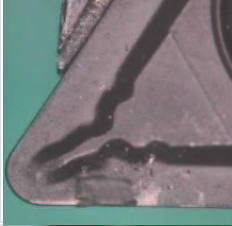
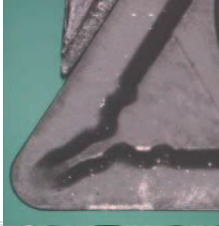


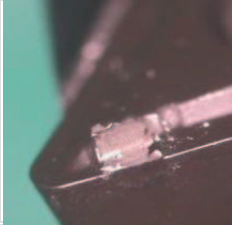

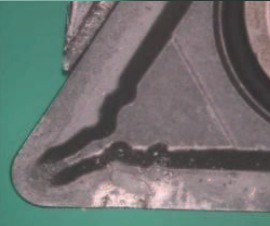
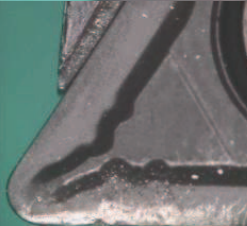
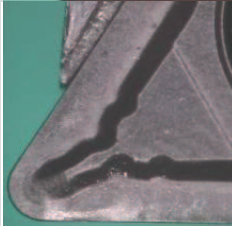
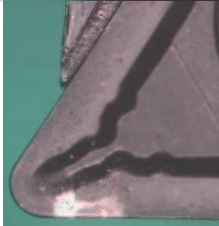
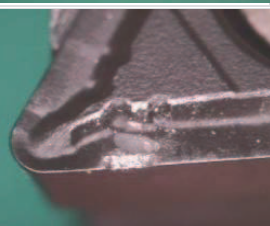
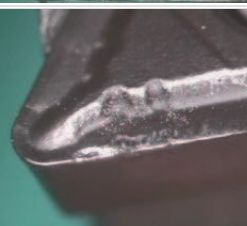

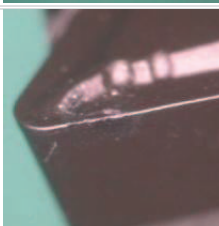
$V_c$ [m/min]	$t_m$		
	Experimental (ms)	Teórico (ms)	% Error = $\frac{(t_m \text{ Teo.} - t_m \text{ Exp.})}{t_m \text{ Exp.}} \cdot 100$
30	0,520	0,571	9,8
45	0,245	0,351	43
65	0,200	0,212	6
80	0,120	0,188	56
100	0,077	0,097	26
125	0,086	0,093	8

En esta tabla se identifica la variación del tiempo de mecanizado real con respecto al teórico (a través del % de error relativo). Estas evidencias permiten identificar que la variación del tiempo de mecanizado es aceptable, por manifestar una tendencia coherente, al incluirse factores externos que afectan al rendimiento de la medición en porcentaje, tales como la temperatura de corte, las vibraciones de la máquina, etc., provocando que la medición sea inestable y dificultosa para su análisis. No obstante, estos resultados cumplen con los objetivos de este apartado.

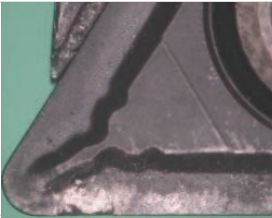

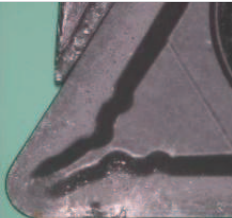
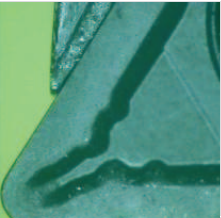

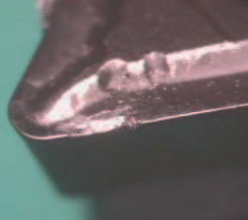



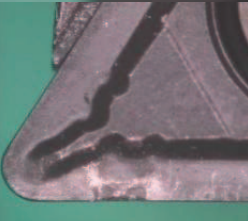

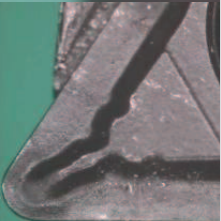


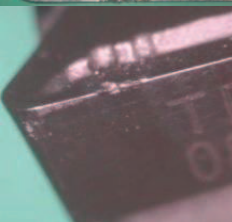

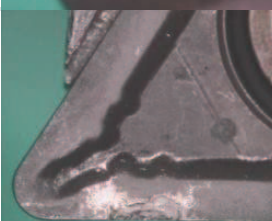
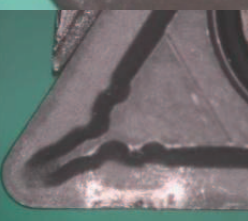
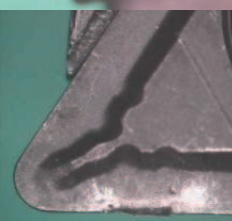
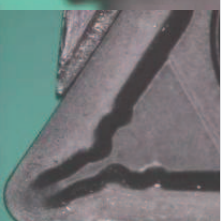


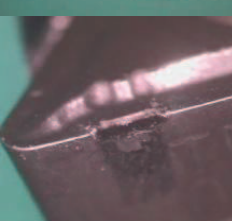
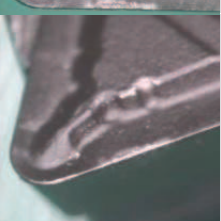
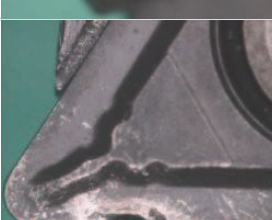


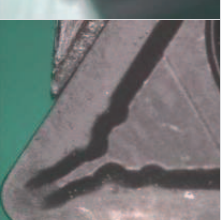



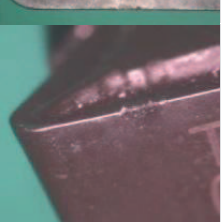
### 5.5 Evaluación del desgaste de la herramienta de corte con respecto a $V_c$ y $f$

El principal interés de este apartado es evaluar e interpretar los mecanismos de desgaste sufridos en la herramienta de corte durante el mecanizado en seco de la aleación *Ti6Al4V* (*UNS R56400*), tal como se ha indicado en el capítulo 4. Se pretende caracterizar las posibles alteraciones geométricas de la herramienta de corte bajo los criterios establecidos en las normas ISO 3685:1993, UNE 16148, ISO 13399:2006 e ISO 513:2012 [3, 20-22]. Para ello, se han empleado técnicas de microscopía óptica, mencionadas al inicio del capítulo, permitiendo extraer de forma cuantitativa el grado de influencia. Para la interpretación del desgaste sufrido durante el mecanizado se tiene en consideración la Tabla 5.8, donde se visualiza la herramienta en dos de sus caras: desprendimiento e incidencia. A tal efecto se han tenido en consideración tanto las características físico-químicas del material y los escenarios de trabajo que hacen que el filo de la herramienta de corte, al tener contacto con el material de la pieza, genere una mayor facilidad en su deformación plástica localizada en la zona de corte, provocando un aumento de la resistencia del material. En efecto, el titanio muestra una baja conductividad térmica (7,07 W/mK), lo que hace que incremente la temperatura del corte y provoque cierta dificultad para disipar el calor, dando lugar a un ablandamiento térmico del material.

**Tabla 5.8** Aspectos macroscópicos de la herramienta de corte, imágenes SOM a 2X.

$V_c$ [m/min]		$f$ [mm/r]			
		0,3	0,2	0,1	0,05
30	Desprendimiento				
	Incidencia				
45	Desprendimiento				
	Incidencia				

Continuación de la tabla




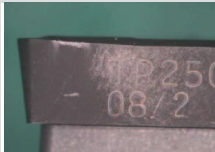
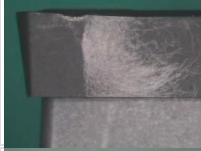





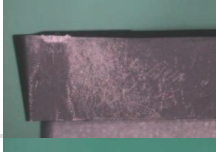





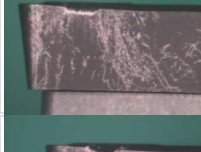

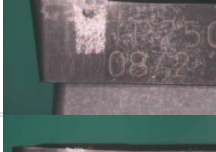

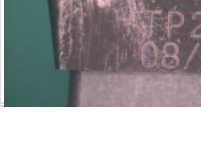


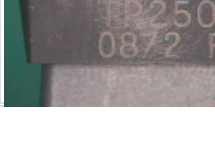
65	Desprendimiento				
	Incidencia				
80	Desprendimiento				
	Incidencia				
100	Desprendimiento				
	Incidencia				
125	Desprendimiento				
	Incidencia				



Como se ha mencionado anteriormente, en cada escenario de trabajo se inicia con un nuevo filo de corte, finalizando después de haber realizado los 10 impactos estipulados. En consideración con las imágenes obtenidas, se identifica que existe una tendencia similar en todos los escenarios de trabajo. Es decir, que a medida que se desarrolla el corte se identifica cierta incorporación del material sobre la cara de desprendimiento, provocando el desgaste progresivo *BUL (Built-Up Layer)*, lo cual está relacionado con el incremento de  $f$  y de  $V_c$ .

Análogamente sucede al interpretar el efecto causado en la cara de incidencia. En este caso se identifica que a medida que incrementa  $f$ , en función de ciertos valores de  $V_c$ , el comportamiento es muy similar; es decir, se localiza cierta capa adherida, provocando una alteración evidente en la geometría de la herramienta (concretamente en el filo secundario del corte), debido a la geometría del corte y las propiedades de la herramienta y del material mecanizado. En la Tabla 5.9 se muestra la evolución del desgaste localizado en la cara de incidencia de la herramienta empleada para cada escenario.

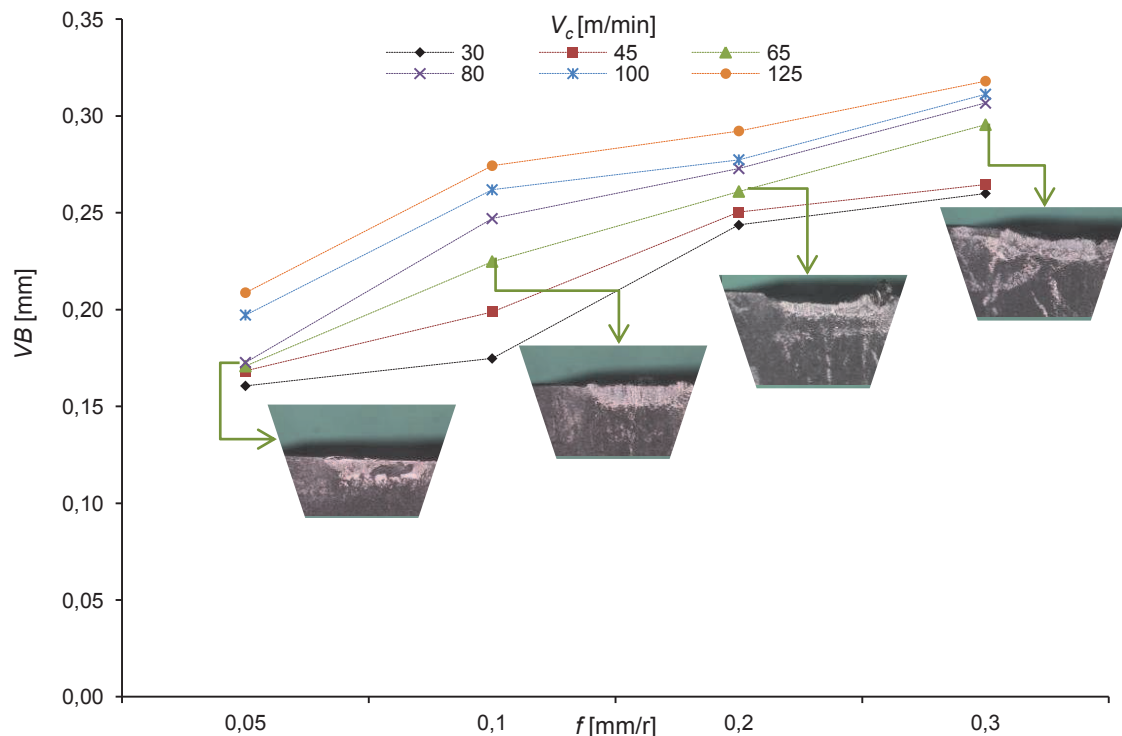
**Tabla 5.9** Aspectos macroscópicos de la herramienta de corte, imágenes SOM a 1,5X.

$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/r]			
	0,3	0,2	0,1	0,05
30				
45				
65				
80				
100				
125				

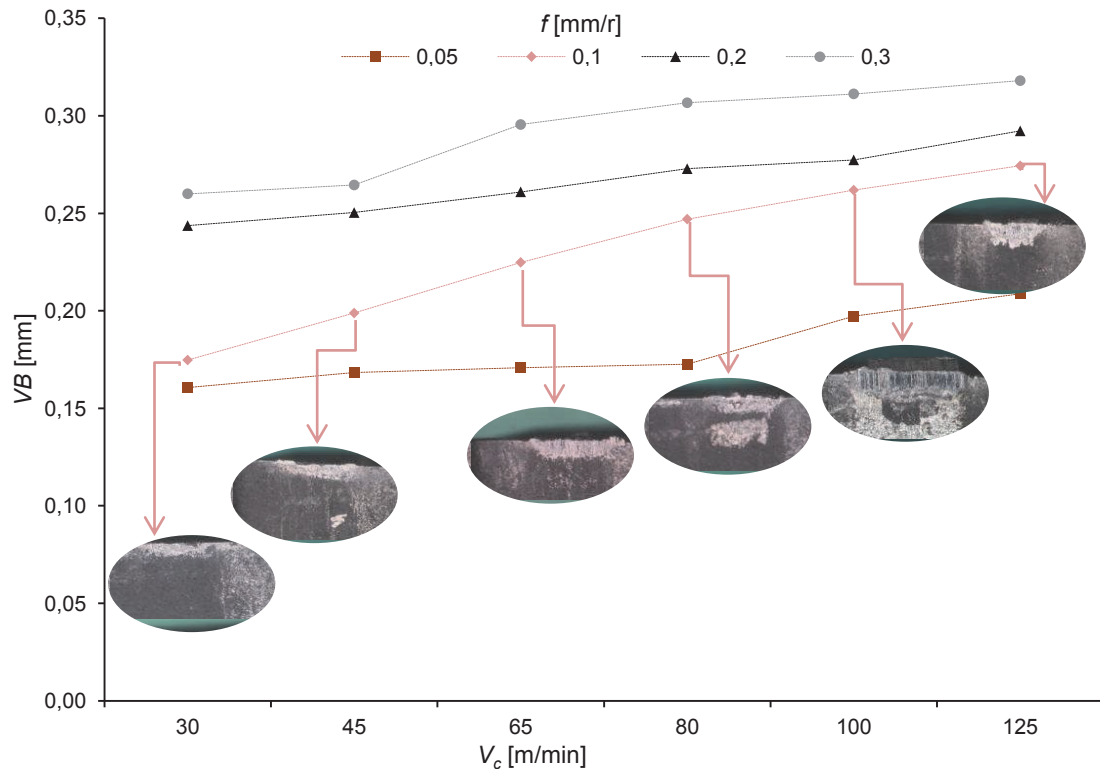
Estas alteraciones pueden estar relacionadas con las oscilaciones de la fuerza de corte o la propia geometría de la viruta obtenida después del corte, ya que podría adherirse material de la herramienta en ella. Por ello, se hace necesario comparar dichos datos y establecer un criterio conjuntando estas ideas, para identificar el grado de influencia de la morfología de la viruta y el desgaste detectado en la herramienta de corte, mediante la medición del desgaste en la cara de incidencia, identificado por  $VB$ , y del área afectada en la cara de desprendimiento  $AB$ .

Antes de proceder con dicha comparación es imprescindible determinar dicho efecto de forma numérica. Así, la Figura 5.21 muestra el valor de la anchura media del desgaste en incidencia  $VB$  en función de  $f$  para cada ensayo. Puede apreciarse que en condiciones de corte severas la herramienta sufre un desgaste considerable y, por consiguiente, incrementa la pendiente de  $VB$ . No obstante, las imágenes que se muestran dentro del gráfico (para un valor de  $V_c$  de 65 m/min) permiten identificar que a medida que aumenta  $f$  (para valores superiores a 0,2 mm/r), la herramienta muestra una fisura considerable, creando una inestabilidad en el corte y, por consiguiente, alcanzando un máximo valor de  $VB$ , muy similar al valor indicado por las normas ISO 3685:1993 y UNE 16148 [3, 22].

En cambio, si se analiza la influencia de  $V_c$  sobre  $VB$ , tal y como se observa en la Figura 5.22 (se incluyen imágenes progresivas para un valor de  $f$  de 0,1 mm/r, para los diversos valores de  $V_c$ ), se observa que a elevados valores de  $V_c$ , superiores a 65 m/min, el filo de corte sufre un desgaste progresivo superior a 0,2 mm (se aprecia material soldado en el filo de la herramienta). En cambio, a velocidades moderadas de 30 m/min a 65 m/min la herramienta muestra una cierta estabilidad y capacidad para soportar los esfuerzos generados en el mecanizado.



**Figura 5.21** Tendencia de  $VB$  con respecto a  $f$  [mm/r].



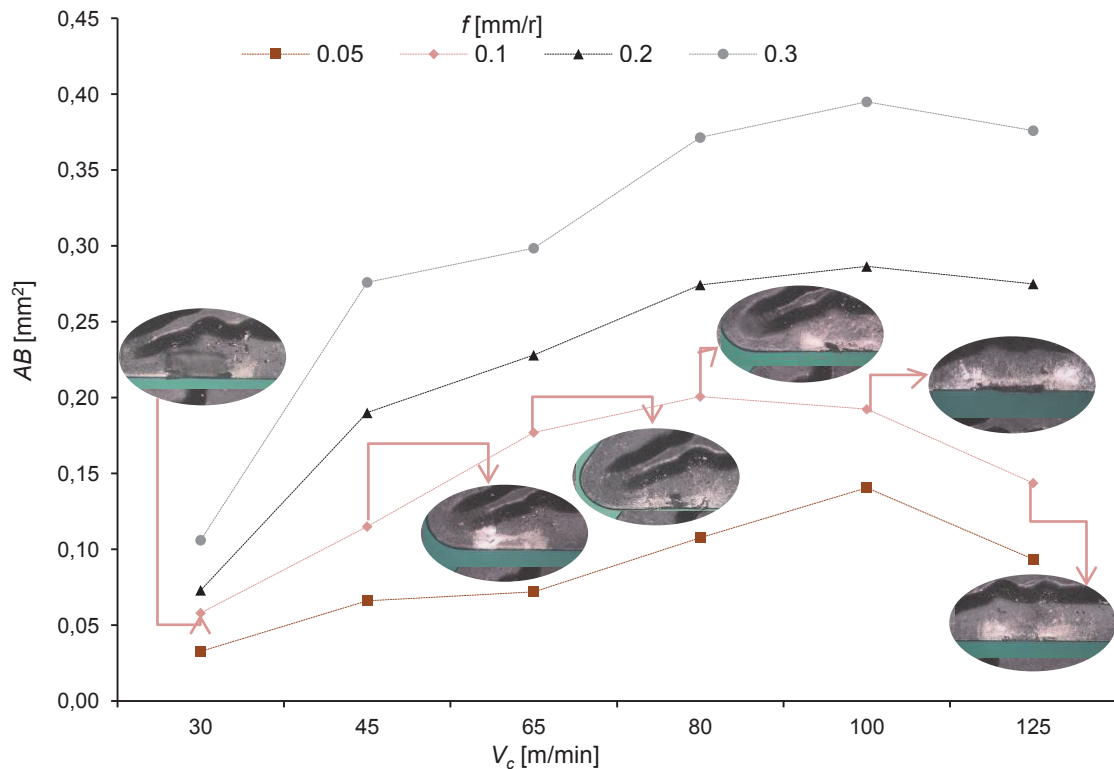
**Figura 5.22** Tendencia de VB con respecto a distintos rangos  $V_c$  [m/min].

Otro criterio a considerar se encuentra relacionado con el desgaste generado en la cara de desprendimiento. En este caso, será evaluado con un criterio cuantitativo, midiendo el área de la zona afectada.

El interés por conocer dicho valor  $AB$  es para tener una visión general sobre la tendencia del mecanismo de desgaste generado, referido a la craterización, causado por un desgaste abrasivo en dicha zona. Identificar dicho efecto permitirá conocer hasta qué punto la zona del cráter alcanza su máxima anchura, causando un daño catastrófico en la herramienta, que en su mayoría se verá reflejado en un desgaste excesivamente rápido en el flanco de la herramienta, siendo favorecido este efecto por un problema químico y térmico en la zona de corte.

La Figura 5.23 reúne los valores adquiridos mediante la técnica de observación establecida en el capítulo 4. Se observa que a medida que incrementa el valor de  $f$  la zona del cráter aumenta de forma considerada. Sin embargo, si se evalúa con respecto a  $V_c$ , se observa un cambio descendiente a partir de  $V_c$  de 80 m/min, lo que no quiere decir que su área disminuya, sino que el mismo cráter se profundiza,; es decir, centra su máxima tensión en la zona de incidencia hasta generar su fractura.

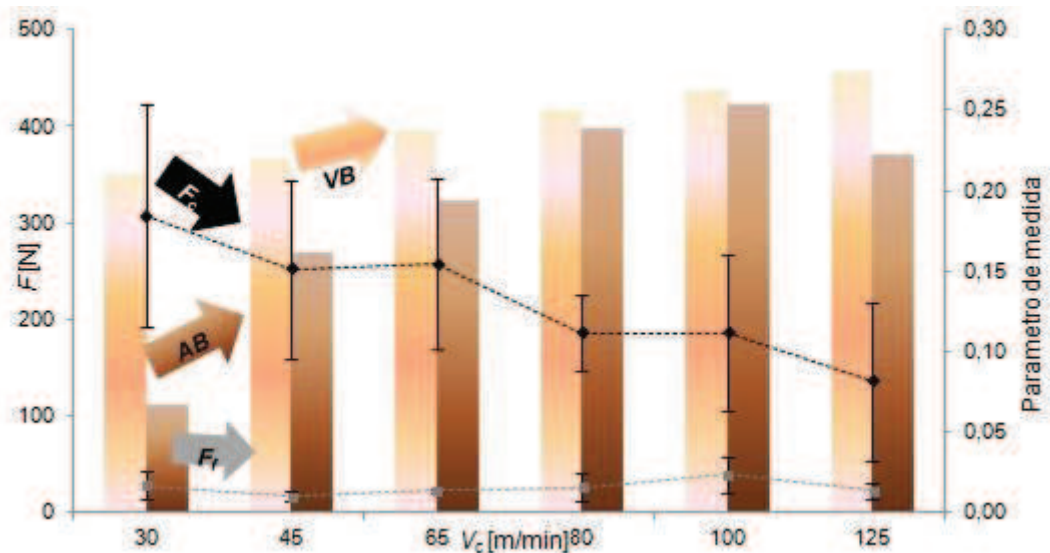
No obstante, se puntualiza que no existe una normativa específica para este criterio, pero si artículos que consideran este tema como parte de una evaluación general relacionada con el desgaste [23, 24].



**Figura 5.23** Tendencia de  $AB$  con respecto a distintos rangos  $V_c$  [m/min].

#### 5.5.1 Análisis del efecto del desgaste sobre las fuerzas de corte

En base de lo anteriormente mencionado, se procede a evaluar el efecto que tiene el desgaste en las caras de incidencia y desprendimiento de la herramienta sobre las fuerzas de corte, en función de la velocidad de corte, Figura 5.24.



**Figura 5.24** Tendencia de fuerzas de corte y desgaste de la herramienta con respecto a  $V_c$

Se observa que, a medida de que incrementa la velocidad de corte, la magnitud de fuerza tangencial  $F_c$  decrece de forma intermitente debido a diversas causas. Una de ellas por el aumento del área de contacto entre la superficie mecanizada y la herramienta de corte.



A su vez, se observa una gran influencia, de forma creciente, correspondiente al desgaste progresivo de la herramienta. En cambio, si se evalúa los valores obtenidos para  $F_f$ , éstos tienden a tener una disposición casi horizontal (menos sensible) en función de la velocidad de corte.

Ahora bien, si se evalúan los valores obtenidos para  $VB$  y  $AB$ , se identifica una tendencia creciente a medida de que incrementa el valor en  $V_c$ ; esto se debe principalmente a la reactividad química que muestra la aleación  $Ti6Al4V$ . En su mayoría se inicia con una ligera capa de oxidación en la cara de desprendimiento y, a medida que aumenta  $V_c$ , se detectan ligeros fragmentos de material (viruta) adheridos en el filo de corte, provocando un fallo de la herramienta de corte por desgaste en flanco y, en consecuencia, una inestabilidad (vibración) en el proceso de corte.

### 5.6 Modelos paramétricos para el mecanizado de aleaciones ligeras

Este último punto tiene como propósito desarrollar, de forma matemática, mediante ecuaciones o modelos paramétricos, el análisis global de la dependencia de cada una de las variables establecidas en esta tesis, con el fin de caracterizar el mecanizado de ciertas aleaciones ligeras, en este caso de  $Ti6Al4V$ , a través del análisis de ciertos aspectos geométrico de la viruta, tales como la altura de los picos  $h_c$ , la altura de los valles  $h_v$ , distancia entre valles  $S$ , el ángulo de cizalla  $\phi$ ; así como el espesor de viruta  $b_v$  y el área de viruta  $S_v$  u otros dos aspectos calculados de forma indirecta, como el factor de recalcado  $\zeta$  y el grado de segmentación  $G_s$ . A su vez se pretende conjuntar otros aspectos de gran interés, como son las fuerzas de corte  $F_c$  y  $F_f$  y el aspecto físico de la herramienta, en este caso respecto al desgaste en la cara de incidencia  $VB$  y al área dañada en la cara de desprendimiento  $AB$ .

La metodología desarrollada en esta investigación se basa en el cálculo de modelos óptimos de regresión, aplicados al resultado de los valores medios obtenidos en cada ensayo. El análisis de la varianza ha permitido establecer los parámetros de control y el grado de influencia de cada variable, cuyo resultado permite identificar el rango de trabajo óptimo para el mecanizado de la aleación  $Ti6Al4V$ , considerando las propiedades del material y la optimización del proceso de corte.

Para evaluar, el conjunto de parámetros mencionados (aspectos geométricos de la viruta, fuerzas de corte y desgaste de la herramienta) es necesario relacionar la variación de los parámetros de corte establecidos previamente y el rango de trabajo (diversos valores de  $f$  como  $V_c$ ). Para ello, se propone el uso de un modelo de tipo potencial, previamente mencionado en el capítulo 2.

Dicho modelo paramétrico tendrá una estructura marginal que permitirá estimar los efectos racionados con las variables de entrada, en función de diversos valores de  $f$  y  $V_c$ , manteniendo constante la variable  $ap$  (ecuación 5.1).

$$\text{Parámetro de estudio} = K \cdot f^x \cdot V_c^y \quad (5.1)$$

Dónde  $K$ ,  $x$  e  $y$  son constantes. Dichos valores conforman el resultado obtenido mediante ajustes de regresión lineal múltiple, en base la siguiente ecuación 5.2.

$$\log(\text{Parámetro de estudio}_{ap}) = \log(K_{ap}) + x_{ap} \cdot \log(f) + y_{ap} \cdot \log(V_c) \quad (5.2)$$

A continuación se presentan, de forma individual, los siguientes apartados subdivididos según el parámetro de estudio, en función de  $f$  y  $V_c$ . Dichos modelos ajustables, estarán representados en el Anexo VIII (Gráficos representativos de modelos ajustados).

### 5.6.1 Modelos paramétricos relacionados con la geometría de la viruta

En este subapartado se identifican los modelos desarrollados para los parámetros geométricos relacionados con la viruta en función de ciertos parámetros tecnológicos ( $f$  como  $V_c$ ), a partir de los valores obtenidos experimentalmente, los cuales se despliegan en la Figura 5.25 y la Figura 5.26.

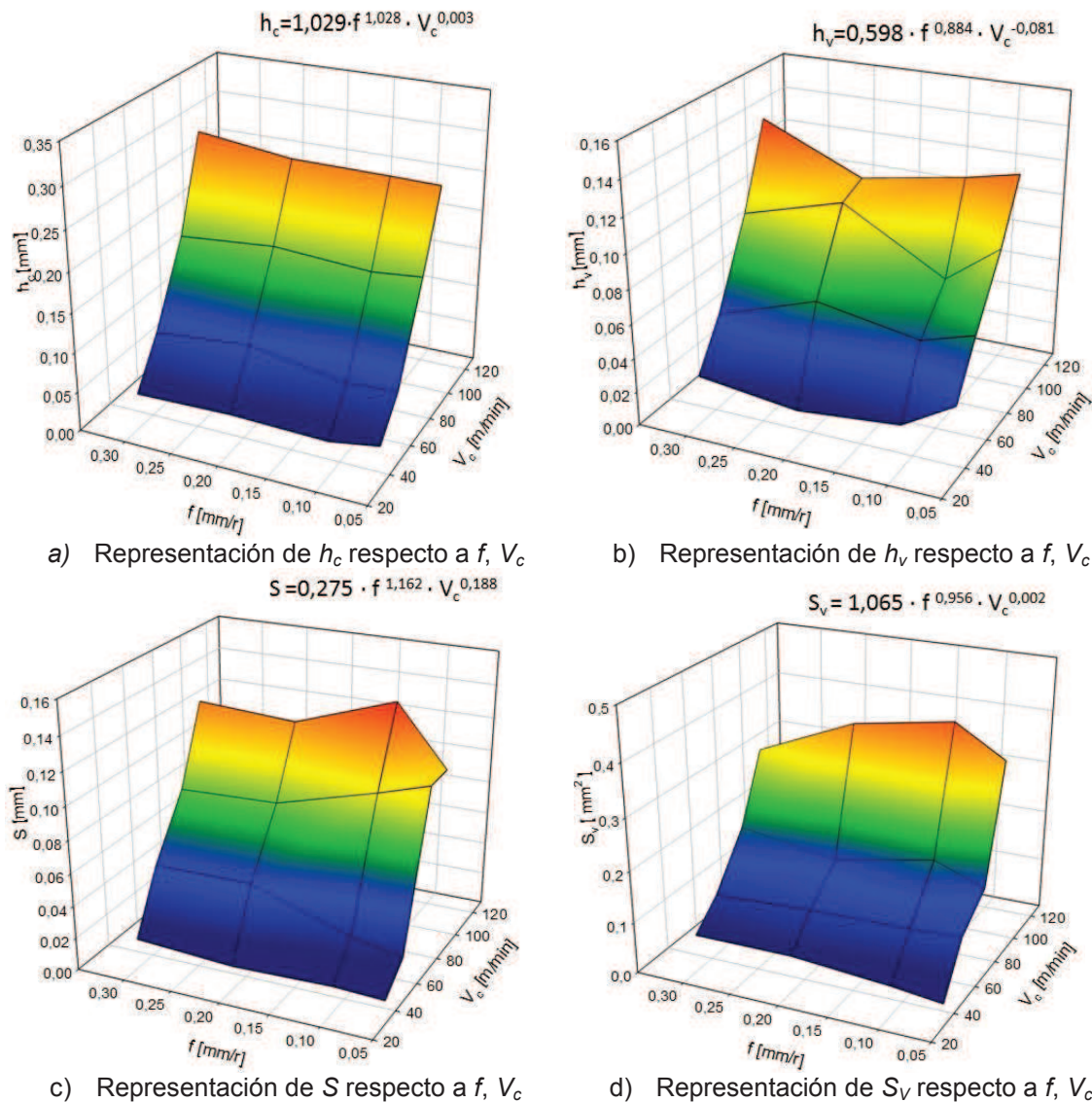


Figura 5.25 Modelos paramétricos relacionados con la viruta: a)  $h_c$ , b)  $h_v$ , c)  $S$  y d)  $S_v$  respecto a  $f$  y  $V_c$ .

Realizando una evaluación global de los modelos obtenidos experimentalmente, se observa en la Figura 5.25 la representación de diversos modelos paramétricos de algunos aspectos geométricos con tendencia a la lineabilidad (mayor afinidad con respecto a  $f$ ). El ajuste de dichos modelos oscila entre los valores de  $R^2$ , comprendidos entre 0,93 hasta 0,99, siendo conveniente analizar cada uno de ellos.

El modelo correspondiente a la Figura 5.25 a) representa la relación de  $h_c$  en función de  $V_c$  y  $f$ . En este caso, el exponente de  $f$  es próximo a la unidad, por lo que muestra más afinidad con respecto a la velocidad de avance; por ello tiende a crecer de manera lineal, mientras que el exponente en  $V_c$  presenta baja correlación (tendencia a la horizontalidad), es decir, tiene escasa influencia sobre la morfología de la viruta.

Por su parte, evaluando el parámetro  $h_v$  (Figura 5.25 b)), su tendencia es similar pero de una forma menos definida que la  $h_c$ . Sin embargo, ambos parámetros están relacionados con el espesor de la viruta y muestran una gran influencia de  $f$ . Se pone en manifiesto que a un menor valor exponencial para  $f$  y valores negativos para  $V_c$ , dando lugar a una baja sensibilidad frente a este parámetro en lo que corresponde a la morfología de la viruta.

El modelo correspondiente a la Figura 5.25 c) representa la tendencia de  $S$ , que aumenta de forma apreciable con  $f$  pero es poco dependiente de la  $V_c$ . En el punto 5.3.2, se identificó que este parámetro caracteriza el comportamiento de la aleación estudiada, comprobándose que efectivamente a mayor valor de  $f$  y de  $V_c$ , la forma de la viruta se ve afectada.

Al analizar la Figura 5.25 d), correspondiente a la  $S_v$ , se observa una tendencia creciente en función de  $f$  pero poco influenciada por la  $V_c$ . Algunos investigadores asocian dicho valor con los efectos geométricos ocasionados en la herramienta de corte. Sin embargo, este indicativo se tiene en consideración en la sección 5.6.3.

Por otro lado, la Figura 5.26 muestra la continuación del resto de los aspectos geométricos mencionados con anterioridad, donde se observa que dicha tendencia, para ambos exponentes ( $f$  y  $V_c$ ), es menor o casi mínima; lo cual indica que tienen una baja influencia sobre el valor del parámetro de estudio seleccionado. El ajuste de dichos modelos oscila entre los valores de  $R^2$ , comprendidos entre 0,087 hasta 0,036; por ello, son considerados parámetros con poca influencia con respecto a  $f$  como para  $V_c$ .

Para iniciar con dicha evaluación se identifica la Figura 5.26 a), correspondiente a  $\phi$ , se puede identificar que el exponente de  $f$  es negativo, dando lugar a una tendencia decreciente. Sin embargo el exponente de  $V_c$  es ligeramente mayor que el de los dos parámetros anteriores, pero igualmente poco significativo frente al de  $f$ . Esto prueba que la geometría de corte realizada para este ensayo (ortogonal) aumenta a medida que incrementa  $V_c$ , hasta alcanzar un valor lineal.

Por otro, el modelo correspondiente a la Figura 5.26 b) permite identificar la tendencia de  $b_v$ , indicando que se ve poco afectada tanto por  $f$  como por  $V_c$ . En el caso del corte

ortogonal, este parámetro no aporta información relevante para analizar el mecanismo de formación de la viruta. En este caso, su valor difiere por debajo de un 5% en comparación con lo valor establecido previamente en la geometría de la probeta de trabajo (ancho de corte  $ap$  de 1 mm), su principal influencia se encuentra en la operación previa al corte ortogonal (ranurado frontal) provocado posiblemente por una ligera oscilación durante el corte. Sin embargo, su valor difiere en orden a la milésima de mm, por lo tanto la tendencia es aceptable.

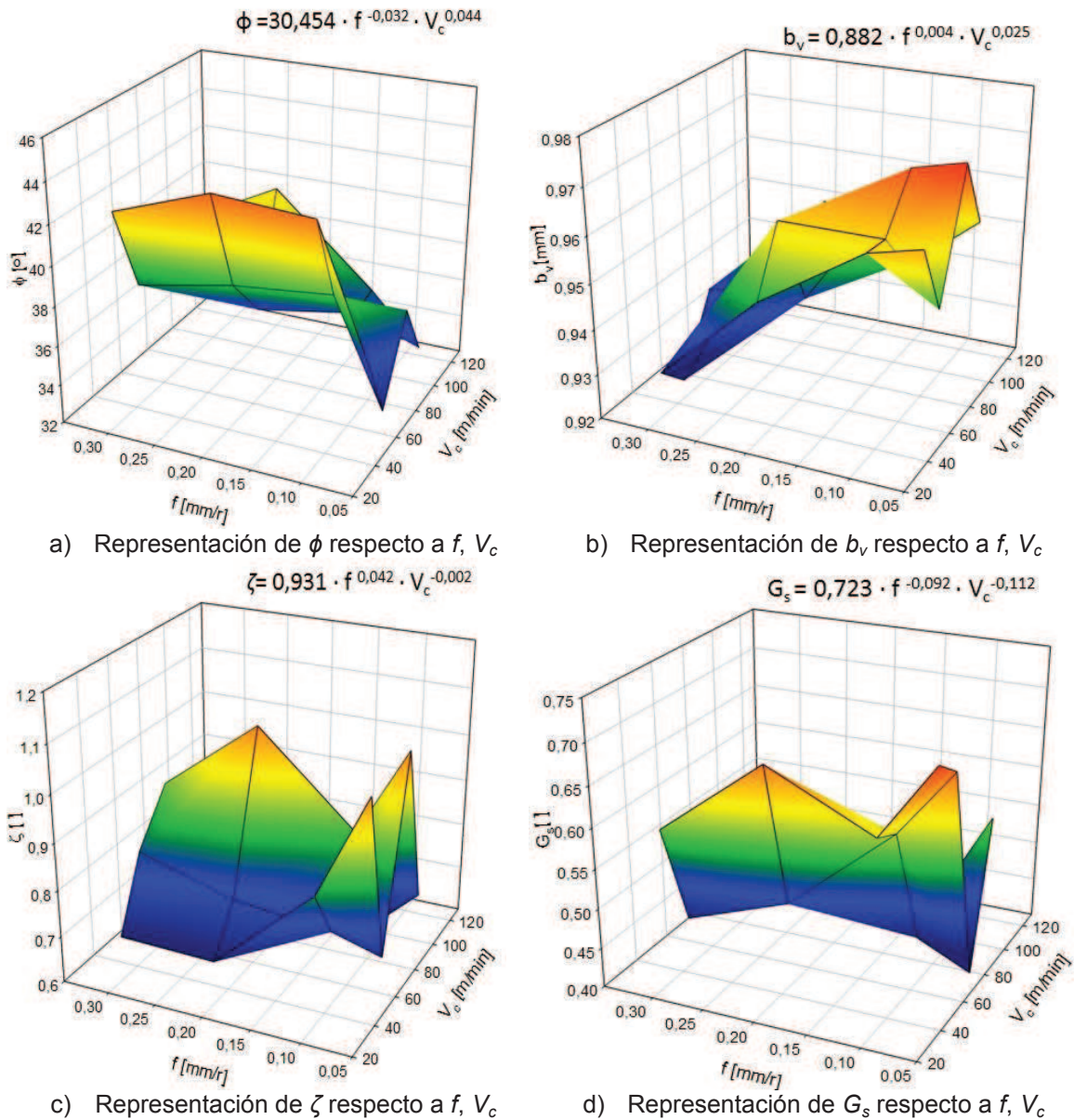


Figura 5.26 Modelos paramétricos relacionados con la viruta: a)  $\phi$ , b)  $b_v$ , c)  $\zeta$  y d)  $G_s$  respecto a  $f$  y  $V_c$ .

Continuando con el análisis, la Figura 5.26 c) representa los valores obtenidos de forma indirecta para el parámetro conocido como factor de acotamiento,  $\zeta$ ; en este caso dicho valor es una comparación entre la secciones transversales antes y después del corte. Evaluando el modelo propuesto, se identifica que el factor de acotamiento es sólo ligeramente sensible a los cambios de  $V_c$  y  $f$ . Este parámetro ( $\zeta$ ) se encuentra íntimamente relacionado con el ángulo de cillazadura y, por ello, es conveniente



recordar que su tendencia es casi homogénea debido a la geometría de corte seleccionada, con tendencia a la unidad.

Para finalizar este apartado se considera la Figura 5.26 d), que representa la influencia en el parámetro  $G_s$ , pudiéndose observar que muestra poca afectación a los cambios de  $f$  y  $V_c$ .

### 5.6.2 Modelos paramétricos relacionados con las fuerzas de corte

Este punto se encuentra destinado al desarrollo de modelos capaces de predecir las fuerzas de corte relacionadas con el mecanizado de aleaciones ligeras mediante el análisis de la operación de torneado con geometría de corte ortogonal, siendo en este caso *Ti6Al4V* el material a evaluar.

Se puede apreciar en la Figura 5.27 a) la tendencia correspondiente a los resultados obtenidos experimentalmente para  $F_c$ . Donde, evaluando valores de los exponentes que representa dicha grafica, se observa que existe una mayor afinidad al incremento de  $f$  y mínima dependencia con respecto a la  $V_c$ . En cambio, si se observa el modelo propuesto para  $F_f$  en la Figura 5.27 b), sus valores muestran poca influencia en las condiciones de corte propuestas en cada escenario de trabajo. Para ambos parámetros de estudio se obtuvo el coeficiente de correlación  $R^2$ , en este caso para  $F_c$  es de 0,86. Dichos valores son próximos a 1, demostrando un buen ajuste lineal. En cambio, con respecto a  $F_f$ , los valores correspondientes a  $R^2$  tienden a 0,017, demostrando una baja influencia con respecto a los parámetros de trabajo ( $f$  y  $V_c$ ).

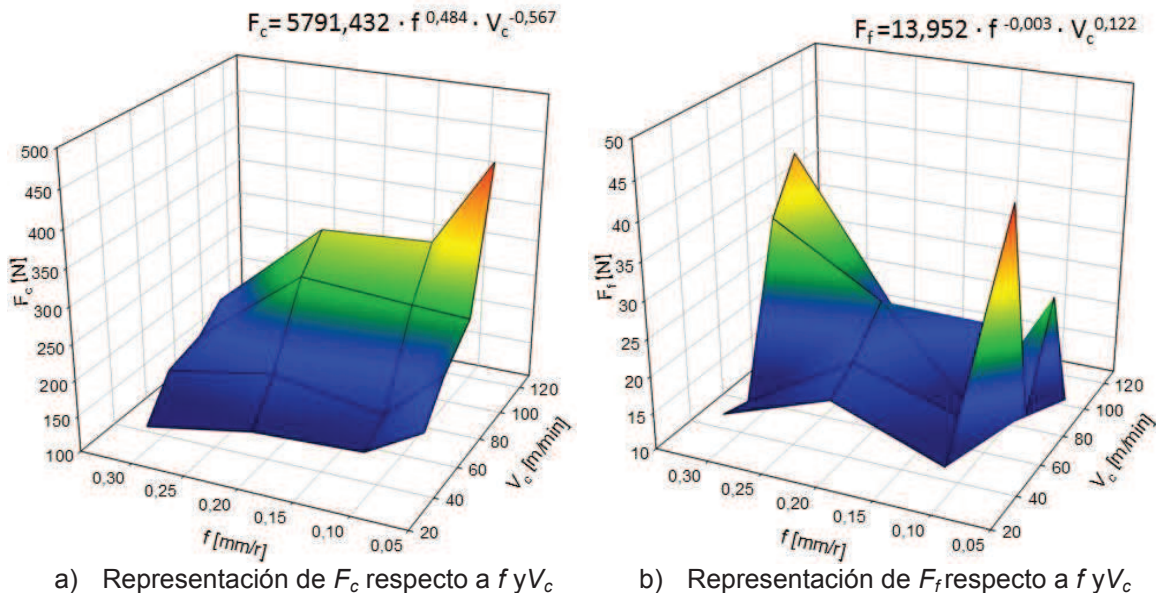


Figura 5.27 Modelos paramétricos relacionados con a)  $F_c$  y b)  $F_f$  para diversos rangos de  $f$  y  $V_c$ .

Gracias a dichos modelos se logra identificar la idónea combinación de  $f$  y  $V_c$ . Debido a que  $f$  se encuentra asociada con la estabilidad del mecanizado y  $V_c$  con el desgaste de la herramienta de corte, ambos afectan al coste y al rendimiento. En este caso, se consideran como condiciones óptimas un rango de trabajo de  $V_c$  de 45 a 65 m/min

para una  $f$  de 0,1 mm/r, según referencias bibliográficas mencionadas con anterioridad [4, 25].

### 5.6.3 Modelos paramétricos relacionados con el desgaste de la herramienta

El propósito de esta sección es identificar un modelo que permita predecir las fuerzas de corte en función del desgaste ocasionado en la herramienta de corte. Durante el desarrollo de este apartado se identificó que para un valor de  $VB$  inferior a 0,2 mm la herramienta muestra cierta estabilidad (poca afectación geométrica), la cual favorece el mecanizado. Por lo tanto, éste es un punto de partida para determinar los límites para modelo propuesto.

Ahora bien, si se consideran los valores de fuerza obtenidos en cada ensayo, se observa que al fracturarse la herramienta se crea una ligera fluctuación en los valores de  $F_c$ , estando dicho efecto íntimamente influenciado por los cambios de  $f$ . En la Figura 5.28 a) se identifica el modelo propuesto para el desgaste en la cara de incidencia de la herramienta de corte, representado por  $VB$ , en función de  $f$  y  $V_c$ .

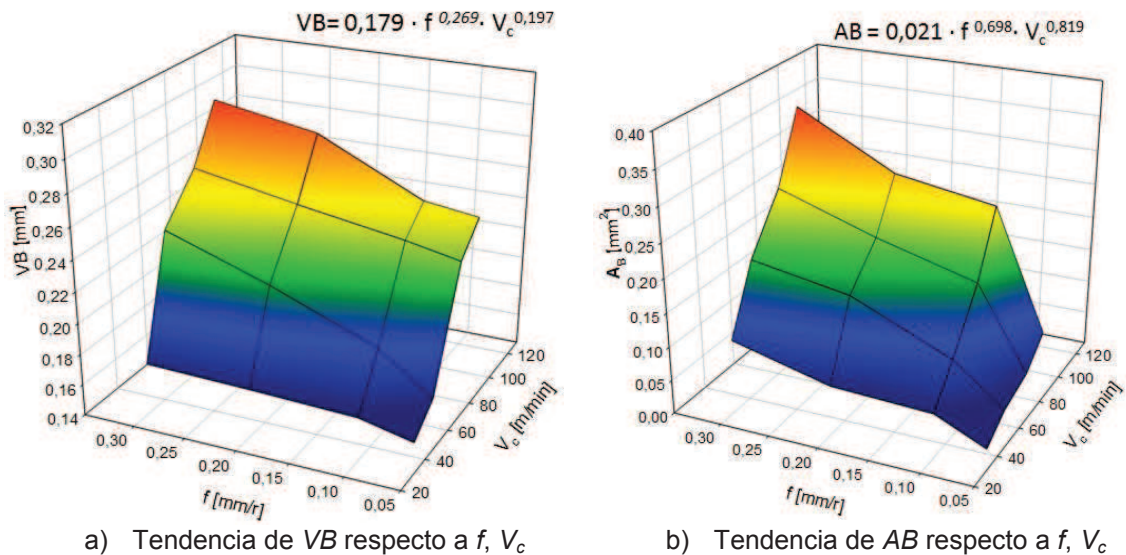


Figura 5.28 Modelos paramétricos relacionados con el desgaste de la herramienta: a)  $VB$  y b)  $AB$  para diversos rangos de  $f$  y  $V_c$ .

Tal como se observa la tendencia de los valores obtenidos para  $VB$ ; el modelo predictivo arroja un exponente significativo para  $f$ , indicando mayor afinidad con respecto a su valor. En cambio, si se evalúa el valor exponencial correspondiente a  $V_c$  su tendencia es de menor afectación. Dicho modelo arroja un valor para  $R^2$  ajustado de 0,94; por lo tanto aceptable.

En cambio, al evaluar la Figura 5.28 b), muestra la tendencia de  $AB$ . Se observa que los exponentes del modelo paramétrico relacionado con los valores obtenidos de forma experimental muestran una influencia alta tanto para  $f$  como para  $V_c$ . Esto indica que el área afectada en la cara de desprendimiento en la herramienta de corte estará afectada de forma indirecta por los cambios producidos tanto en el avance como en la velocidad de corte.

## 5.7 Conclusiones

En este capítulo se ha desarrollado una serie de criterios que relacionan la morfología de la viruta, las fuerzas de corte y del desgaste de la herramienta de corte. Estos criterios fueron validados con referencias científicas basadas en ensayos similares a los desarrollados en esta investigación, concluyéndose que las condiciones severas de trabajo provocan una aceleración del desgaste de las herramientas, ocasionando la inestabilidad del mecanizado o incluso una afectación crucial en la propia geometría de la pieza de trabajo.

En el presente trabajo se ha realizado una propuesta metodológica para la caracterización de las fuerzas de corte en el proceso de cilindrado en seco de la aleación *UNS R56400 (Ti6Al4V)*, teniendo en cuenta su relación con parámetros tecnológicos asociados al proceso, concretamente el avance y la velocidad de corte. Para ello, se han identificado y descrito las distintas etapas de la metodología, así como los recursos materiales e instrumentales empleados, aplicando diversas técnicas de monitorización (*ON-LINE* como *OFF-LINE*) que permiten controlar el seguimiento de las fuerzas de corte, aspectos geométricos de la viruta y el desgaste de la herramienta.

En lo que corresponde a los parámetros geométricos de la viruta, los resultados han puesto de manifiesto una tendencia general a la obtención de una morfología de viruta de tipo segmentada que sólo se ve alterada para la combinación de altos valores de  $f$  y bajos valores de  $V_c$ , dónde se observa una mayor tendencia a la fragmentabilidad.

Finalmente, a partir de los datos experimentales, se han obtenido modelos paramétricos potenciales que permiten predecir ciertos parámetros geométricos de gran interés, tales como  $h_c$ ,  $h_v$ ,  $S$ ,  $\phi$ ,  $b_v$ ,  $S_v$ ,  $G_s$  y  $\zeta$  en función de diversos rangos de trabajo, tanto para  $f$  como para  $V_c$ . Se ha determinado que, para la aleación estudiada, el análisis de la viruta manifiesta que el avance es uno de los parámetros de mayor influencia en el proceso de corte, y que, en combinación con altos valores de velocidad de corte, puede lograr el incremento en la sección de la viruta y, por tanto, suponer un mayor consumo energético para realizar corte.

Por otro lado, se ha demostrado que este estudio brinda un método alternativo que enfatiza el comportamiento transitorio de las fuerzas de corte durante los primeros instantes del mecanizado, permitiendo identificar aquellas variables que pueden afectar de forma significativa a la estabilidad del proceso.

Finalmente, en lo que respectan a las fuerza de corte, se identifica que bajos valores de  $V_c$  provocan un incremento de  $F_c$  y  $F_t$ ; en cambio sus valores disminuyen al aumentar  $V_c$ . Visto desde la perspectiva de  $f$ , el valor de sus fuerzas aumenta a medida que se incrementa  $f$ . El resultado de fuerzas tiene una relación directa con los aspectos físicos encontrados tanto en la herramienta como en la viruta.

Por ello, se han propuesto una serie de modelos marginales que permiten predecir las fuerzas de corte para el mecanizado de la aleación *Ti6Al4V*. Por otro lado, gracias a



los datos obtenidos, ha sido posible considerar, como líneas complementarias, el desgaste de la herramienta en relación con las fuerzas de corte.

Con referencia a los aspectos físicos encontrados en la herramienta de corte, se ha identificado un desgaste prematuro en el filo de corte, tanto en la cara de incidencia como de desprendimiento, ambos relacionados con el incremento de  $V_c$  y  $f$ .

Las evidencias obtenidas se encuentran asociadas a la reactividad química que presenta el mecanizado de aleaciones con base titanio, es decir, su baja conductividad térmica y su elevado calor específico generan un incremento acelerado del desgaste, el cual ha sido posible identificar en los primeros instantes del corte.

## Referencias

- [1] UNE / ISO 5832-3:2012 Implantes quirúrgicos. Materiales metálicos. Parte 3: Aleación forjada a base de titanio, aluminio 6 y vanadio 4. (ISO 5832-3:1996). (2012).
- [2] UNE 38723:1981 Titanio y aleaciones de titanio para forja. Grupo alfa + beta. Aleación L-7301, Ti-6 Al 4 V. (1981).
- [3] ISO 3685:1993 Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools. Genève, Switzerland, (1993).
- [4] M. Batista Ponce. Características de los mecanismos de adhesión secundaria y su influencia en el desgaste de herramientas de corte. Aplicación al mecanizado en aleaciones ligeras. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, (2013).
- [5] W. Grzesik. Mechanics of cutting and chip formation in Machining of Hard Materials. ed: Springer, (2011). 87-114.
- [6] M. Kikuchi, O. Okuno. Machinability evaluation of titanium alloys. Dental materials journal, 23, (2004). 37.
- [7] M. Batista, J. Salguero, A. Gomez, S. Fernández, M. Marcos. SOM based Methodology for Evaluating Shrinkage Parameter of the Chip Developed in Titanium Dry Turning Process. Procedia CIRP, 8, (2013). 534-539.
- [8] G. Sutter, G. List. Very high speed cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy—change in morphology and mechanism of chip formation. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 66, (2013). 37-43.
- [9] M. Batista, M. Calamaz, F. Girot, J. Salguero, M. Marcos. Using Image Analysis Techniques for Single Evaluation of the Chip Shrinkage Factor in Orthogonal Cutting Process. Key Engineering Materials, 504, (2012). 1329-1334.
- [10] S. Zhang, Y. B. Guo. An experimental and analytical analysis on chip morphology, phase transformation, oxidation, and their relationships in finish hard milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49, (2009). 805-813.
- [11] M. D. Morehead, Y. Huang, J. Luo. Chip morphology characterization and modeling in machining hardened 52100 steels. Machining science and technology, 11, (2007). 335-354.
- [12] M. Calamaz, D. Coupard, F. Girot. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48, (2008). 275-288.
- [13] R. Li, A. Shih. Finite element modeling of 3D turning of titanium. in ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, (2004). 825-833.
- [14] S. Sun, M. Brandt, M. S. Dargusch. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49, (2009). 561-568.
- [15] A. Daymi, M. Boujelbene, S. B. Salem, B. H. Sassi, S. Torbaty. Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces. Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering, 1, (2009). 77-83.
- [16] P. A. Rosa, O. Kolednik, P. Martins, A. Atkins. The transient beginning to machining and the transition to steady-state cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, (2007). 1904-1915.
- [17] P. Oxley. Shear angle solutions in orthogonal machining. International Journal of Machine Tool Design and Research, 2, (1962). 219-229.

- [18] G. Sutter. Chip geometries during high-speed machining for orthogonal cutting conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, (2005). 719-726.
- [19] J. C. Williams, E. A. Starke Jr, . Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*, 51, (2003). 5775-5799.
- [20] ISO 13399:2006 Cutting tool data representation and exchange. Part 1: Overview, fundamental principles and general information model. Genève, Switzerland, (2006).
- [21] ISO 513:2012 Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges — Designation of the main groups and groups of application. Genève, Switzerland, (2012).
- [22] AENOR 16148:1985 Ensayos de duración de herramientas de torno de corte único. Madrid, España, (1985).
- [23] A. Devillez, S. Lesko, W. Mozer. Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry. *Wear*, 256, (2004). 56-65.
- [24] S. H. I. Jaffery, P. T. Mativenga. Wear mechanisms analysis for turning Ti-6Al-4V—towards the development of suitable tool coatings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58, (2012). 479-493.
- [25] J. M. Gerez Miras. Estudio del torneado en seco de la aleación Ti6Al4V. Relaciones paramétricas para el acabado superficial. Universidad de Cádiz, (2014).





# CAPÍTULO 6

---

## CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS





**Índice**

<b>6.1 Introducción .....</b>	<b>6.1</b>
<b>6.2 Conclusiones .....</b>	<b>6.1</b>
<b>6.3 Líneas futuras .....</b>	<b>6.7</b>



## 6.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan las principales conclusiones obtenidas en base al desarrollo de esta Tesis Doctoral, para ello se indicará tanto las conclusiones generales de la tesis, así como el resto de las conclusiones particulares que se han ido generando a lo largo del desarrollo de la misma, y que han ido apareciendo a lo largo de los capítulos precedentes, quedando ahora recogidas de forma unificada.

Dada la importancia que actualmente tiene la innovación y caracterización materiales estratégicos de uso aeronáutico, este trabajo de investigación ha tenido como principal objetivo desarrollar una metodología que permite interpretar los fenómenos observados de forma experimental en el mecanizado de dichos materiales, a la vez que construir modelos predictivos. Para ello se ha generado y propuesto un conjunto de técnicas que facilitan conocer el comportamiento de la aleación *Ti6Al4V* durante su mecanizado, desde una perspectiva más general, de manera que tanto la metodología como resultados obtenidos de forma empírica sean de utilidad para el usuario final.

Por otra parte, dada la complejidad y diversidad de aspectos que conlleva este tema, el nivel de desarrollo de la línea de investigación se ve influenciado por la duración y coste de los experimentos. Por ello, se han acotado el número de factores totales considerados para su análisis: morfología de la viruta, fuerzas de corte y desgaste de la herramienta. Para tener en cuenta los límites de esta necesaria acotación, dentro de este capítulo se establecen algunas posibles propuestas de líneas futuras, con el propósito de extender aquellas directrices vinculadas a los nuevos desarrollos que permitan ampliar nuevas variables que complementen las contempladas en esta tesis doctoral.

## 6.2 Conclusiones

En la presente tesis se ha establecido una metodología que permite caracterizar el mecanizado en seco de aleaciones ligeras a través del análisis morfológico de la viruta. En particular, esta investigación ha centrado su interés en la evaluación de la aleación *Ti6Al4V* (*UNS R56400*), teniendo en cuenta su relación con parámetros tecnológicos asociados al proceso de torneado en ausencia de fluidos de corte. Para ello, se ha diseñado, identificado y descrito las distintas etapas de la metodología propuesta, así como los recursos materiales e instrumentales empleados, aplicando

diversas técnicas de monitorización que han permitido controlar el seguimiento de las variables mayor interés, tales como las fuerzas de corte, los aspectos geométricos de la viruta y el desgaste de la herramienta.

A lo largo de la investigación se han ido deduciendo diversas conclusiones de gran relevancia para esta tesis, de las cuales se comparte a manera de resumen:

1. Ha sido posible realizar una aproximación al estado del arte encaminado a la caracterización morfológica de la viruta durante el proceso de torneado, teniendo en cuenta su relación con los parámetros tecnológicos de corte. Dentro de esta temática se ha posibilitado identificar modelos matemáticos aplicables a la predicción del comportamiento del mecanizado en función de los parámetros tecnológicos de corte; en este caso se refiriéndose a la velocidad de corte  $V_c$ , velocidad de avance  $f$ , así como también a la profundidad de corte; para este estudio fue considerado constante y nombrada como *ap*.
2. Gracias a esta investigación, se ha identificado la demanda tecnológica relacionada con el desarrollo de materiales estratégicos para el sector aéreo; con especial atención en las aleaciones ligeras, considerando la aleación *Ti6Al4V* (UNS R56400) como parte del grupo de aleaciones ligeras de uso aeronáutico. También se ha subrayado la importancia de su caracterización durante el mecanizado e identificado, mediante referencias bibliográficas, las diversas técnicas de estudio relacionadas con este tema.
3. Se ha desarrollado una metodología que caracteriza morfológica y geométricamente la viruta en el proceso de torneado en seco de aleaciones ligeras de uso aeronáutico, particularizando el estudio en la aleación *Ti6Al4V* (UNS R56400), y teniendo en cuenta su relación con parámetros y variables tanto de entrada como de salida asociados al proceso de corte. A su vez, se han analizado otras variables de interés, en particular los efectos causados en la herramienta de corte, mediante la identificación y medición de las zonas afectadas: la cara de incidencia y la de desprendimiento. Igualmente se ha considerado la adquisición de fuerzas de corte durante el proceso.
4. Se ha diseñado una probeta de trabajo con geometría tubular, partiendo de una barra cilíndrica. Este diseño ha permitido adaptarse a los medios materiales y a los equipamientos establecidos para esta línea de investigación.
5. Se ha caracterizado el material, antes y después de su mecanizado, mediante el empleo de técnicas de microscopía óptica (*SOM, Stereoscopic Optical Microscopy*).
6. Se ha analizado y considerado el uso de técnicas metalográficas como instrumento fundamental para la caracterización de la viruta y de la herramienta de corte, aplicando técnicas de monitorización *OFF LINE*; en particular, bajo la ejecución de ensayos con microscopía óptica, así como los recursos materiales e instrumentales empleados.

7. Se han establecido diversos procedimientos dentro del protocolo experimental, aplicando la técnica de monitorización *ON LINE*, a fin de adquirir los efectos generados en el proceso en tiempo real. Para ello se ha realizado la adquisición de las fuerzas de corte, tanto en fotogramas como videos, lo que ha permitido conservar gráficamente imágenes de cada ensayo y, gracias a ello, determinar el grado de validez de las hipótesis en función de los resultados.
8. Gracias a los datos obtenidos, ha sido posible considerar, como líneas complementarias, la evaluación macrogeométrica de la viruta en relación con las fuerzas de corte. Se ha identificado la morfología de la viruta, de tipo diente de sierra fragmentada, en función de diversos rangos de  $f$  como  $V_c$ . Sin embargo, a medida que se incrementa  $f$ , el espesor de la viruta aumenta de forma considerable, estando relacionada con el crecimiento de fuerzas de corte requerida para remover dicha viruta.
9. Se han medido de forma experimental distintos aspectos geométricos de la viruta (sección longitudinal como transversal) e identificando ciertos parámetros geométricos de gran interés, tales como la altura de los picos  $h_c$ , la altura de los valles  $h_v$ , la distancia entre valles  $S$  y el ángulo complementario  $\theta$ , que han servido para calcular el ángulo de cizalla  $\phi$ , espesor de viruta  $b_v$  y área de viruta  $S_v$ , así como otros dos indirectos: el factor de recalcado  $\zeta$  y el grado de segmentación  $G_s$ . Todos ellos han sido caracterizados en función de diversos rangos de trabajo, tanto para  $f$  como para  $V_c$ . Se ha determinado que, para la aleación estudiada, el análisis de la viruta manifiesta que el  $f$  es uno de los parámetros de mayor influencia en el proceso de corte, y que, en combinación con altos valores de  $V_c$ , puede lograr el incremento de la sección de la viruta, dónde se observa una mayor tendencia a la fragmentabilidad.
10. En el caso particular de  $h_c$  y  $h_v$ , éstos parámetros muestran una tendencia creciente relacionada al incremento de  $f$ , encontrándose ambos íntimamente ligados con el espesor de la viruta. Gracias a estos parámetros, ha sido posible identificar la inestabilidad termoplástica sufrida en el material durante su mecanizado.
11. Igualmente, se ha identificado el mayor grado de influencia sobre  $S$  del parámetro tecnológico  $f$ . Se ha constatado que está relacionado con el comportamiento propio de la aleación estudiada. A medida que aumenta  $f$  conlleva mayor tensión, provocando una disminución de la resistencia del material.
12. Por otro lado, se ha evaluado la tendencia con respecto  $\phi$ . sus valores indican que se ve poco influenciado con  $f$ . Sin embargo, se ha comprobado que sus valores cumplen con el modelo establecido por Stabler, en lo que se refiere al corte ortogonal (su valor tiende de  $40^\circ$  a  $45^\circ$ ).
13. Se han comparado los valores obtenidos experimentalmente para  $b_v$ . Se ha observado que dichos valores están relacionados con el ancho de pared

mecanizada establecido en el diseño del corte o bien,  $ap$ , con un valor analizado de 1 mm.

14. Se ha identificado la influencia en el valor de  $S_v$ . Se ha mostrado una fuerte dependencia con  $f$  con tendencia homogénea de forma lineal. A su vez posee una relación directa con el valor calculado al factor de recalcado.
15. Finalmente ha sido posible conocer dos parámetros geométricos de la viruta de forma indirecta:  $\zeta$  y  $G_s$ . Ambos resultados han mostrado una baja influencia con respecto a  $V_c$  y  $f$ . No obstante, el valor obtenido para  $\zeta$ , ha presentado una cercanía al valor unitario, lo que indica que cumple con el criterio de corte ortogonal. El conocimiento del valor de  $G_s$  permite determinar la variación de la conductividad térmica de la aleación (relacionada con la diferencia de altura entre  $h_c$  y  $h_v$ ). Por lo tanto, se ha identificado que al incrementar de  $f$ , la conductividad es mayor y su valor tiende aproximarse a la unidad.
16. Se ha llevado a cabo una metodología práctica e innovadora, dirigida a la adquisición de fuerzas de corte, con la que se ha adaptado tanto el diseño de la probeta como la propia geometría de corte ortogonal. Se han comparado y validado los resultados mediante estudios obtenidos de referencias bibliográficas, tanto de los parámetros de trabajo como del propio material.
17. La metodología establecida para la adquisición de fuerzas ha demostrado ser un método alternativo que enfatiza el comportamiento transitorio (cuasi-estable) de las fuerzas de corte, durante los primeros instantes del mecanizado, permitiendo identificar aquellas variables que pueden afectar de forma significativa la estabilidad del proceso.
18. A su vez se ha identificado que la  $F_c$  en la dirección tangencial al corte es la que mayor influencia tiene sobre el desgaste de la herramienta. En cambio, la  $F_f$  experimenta menor variación con el desgaste, aunque experimenta una sensibilidad mínima causada por la fricción de la viruta al momento de ser evacuada. Donde, ha sido posible conocer que el valor obtenido experimentalmente para  $F_f$  es inferior a  $F_c$  (equivalente a un 10% respecto al valor medio de  $F_c$ ), lo que indica que la pieza ejerce mayor presión en la herramienta durante el impacto. En  $F_f$  se muestra el rozamiento de la herramienta durante el corte, causado por el contacto con la viruta, por lo que su valor es muy inferior.
19. En lo que respectan a las fuerza de corte, se identifica que a bajos valores de  $V_c$  provoca un incremento de  $F_c$  y  $F_f$ ; en cambio, sus valores disminuyen al aumentar  $V_c$ . Visto desde la perspectiva de  $f$ , el valor de sus fuerzas aumenta a medida que se incrementa  $f$ . El resultado de fuerzas tiene presenta correlación con los aspectos físicos encontrados tanto en la herramienta como en la viruta.
20. Se ha evaluado la tendencia global de  $F_c$ , la cual depende de forma directa de los rangos establecidos para  $f$ . Se ha observado que le valor de  $F_c$  pasa de un 13%, para rangos bajos de  $f$ , hasta llegar a un 30% mayor, en el caso de  $f$  superiores a

0,2 mm/r (el % ha sido calculado con respecto a la media total de  $F_c$  adquiridos en ciento rango de  $f$  y comparando con el siguiente rango de  $f$ ). Esto indica que  $f$  es una variable que influye en el comportamiento de  $F_c$ .

21. A través de las referencias bibliográficas relacionadas con las fuerzas de corte durante el mecanizado de aleaciones con base de titanio, se ha advertido su coincidencia con los resultados obtenidos de forma experimental en esta tesis, pues la combinación a altos valores de  $V_c$  y  $f$  requieren menor fuerza de corte, lo que es debido al bajo módulo de elasticidad que muestra dicha aleación (en este caso *Ti6Al4V*) y al alto rango de temperatura generado durante el corte. No obstante, evaluando la influencia de la  $V_c$  en ambas fuerzas, se ha observado que a mayor  $V_c$  se reduce de forma considerable la  $F_c$ , debido a que la temperatura de corte aumenta respecto al valor de  $V_c$ , reduciendo igualmente la resistencia del material (ablandamiento térmico), y, por ello, resultando menor la fuerza en la herramienta.
22. Por otro lado, gracias a las técnicas de monitorización *OFF LINE*, se ha observado material adherido en el filo de corte, efecto que aumenta a medida que se incrementan los parámetros de corte ( $V_c$  y  $f$ ); en cambio, a menor rango de  $V_c$  y  $f$ , el material, en base a sus características mecánicas, opone cierta resistencia al corte. Por ello, el proceso de corte requiere que las fuerzas de corte experimenten una tendencia creciente para lograr eliminar el material.
23. Se ha propuesto una metodología para la medición de la zona afectada en la herramienta de corte, caracterizada mediante el área dañada en la superficie de la cara de desprendimiento y en la de incidencia, tras la finalización de la operación de corte.
24. Con referencia a los aspectos físicos encontrados en la herramienta de corte, se ha identificado un desgaste prematuro en el filo de corte, tanto en la cara de incidencia como de desprendimiento, ambos relacionados con el incremento de  $V_c$  y  $f$ . Las evidencias obtenidas se encuentran asociadas con la reactividad química que presenta el mecanizado de aleaciones con base titanio; es decir, su baja conductividad térmica y su elevado calor específico generan un incremento acelerado de su desgaste que ha sido posible identificar en los primeros instantes del corte. Este comportamiento se ha esquematizado de forma gráfica, estableciéndose un criterio óptimo que reúne tanto un mejor control al desgaste como un rango de trabajo idóneo para el mecanizado de dicha aleación.
25. Se han comparado los resultados obtenidos experimentalmente en relación con el aspecto físico de la viruta y la herramienta de corte, aplicando los criterios establecidos por las normas ISO 3685:1993 y UNE 16148.
26. En el caso correspondiente a la morfología de la viruta, se ha clasificado la viruta obtenida experimentalmente dentro del tipo diente de sierra, con tendencia variable, es decir, a valores bajos de  $f$  se muestra de tipo helicoidal enredada, con tendencia a la formación de nidos de viruta. En cambio, en un amplio rango de



valores de  $V_c$  y  $f$ , esta tendencia pasa a tipo de viruta helicoidal tubular fragmentada hasta llegar a ser de tipo cónica fragmentada.

27. En lo que corresponde a los valores obtenidos para el desgaste generado en la herramienta de corte, se ha observado que en condiciones de corte severas la herramienta sufre un desgaste considerable y, por consiguiente, incrementa el valor de  $VB$ . En este caso, se hizo mención que, para un valor de  $V_c$  de 65 m/min y en un rango de trabajo de  $f$  (superiores a 0,2 mm/r), la herramienta muestra una fisura considerable, creando una inestabilidad en el corte y, por consiguiente, alcanzando un máximo valor de  $VB$ , muy similar al valor indicado por las normas, refiriéndose a la anchura media del desgaste de la cara de incidencia principal  $VB = 0,3$  mm. En cambio, a velocidades moderadas de 30 m/min a 65/min, en un rango de trabajo para  $f$  de 0.1 r/min, la herramienta muestra una cierta estabilidad y capacidad para soportar los esfuerzos generados en el mecanizado. Dentro de este punto, se midió el área de la superficie dañada en la cara de desprendimiento, a través de  $AB$ . Se ha demostrado que está íntimamente influenciada por  $V_c$  y  $f$ . Sin embargo, el grado de influencia está determinado por la combinación de los rangos de trabajo. A bajos valores de  $V_c$  y  $f$ , la superficie de la herramienta permanece casi constante (poca afectación). En cambio, a medida de que incrementa  $V_c$  y  $f$ , se observa que la superficie de la herramienta se ve afectada por fragmentos de material adheridos durante el corte.
28. Se ha demostrado que en los valores obtenidos para  $VB$  y  $AB$  se identifica una tendencia creciente a medida de que se incrementa el valor en  $V_c$ ; esto se debe principalmente a la reactividad química que muestra la aleación *Ti6Al4V*. En su mayoría se inicia con una ligera capa de oxidación en la cara de desprendimiento y, a medida que aumenta  $V_c$ , se detectan ligeros fragmentos de material (viruta) adheridos en el filo de corte, provocando un fallo de la herramienta de corte por desgaste en flanco y, en consecuencia, una inestabilidad (vibración) en el proceso de corte.
29. Se ha demostrado que el rango de trabajo óptimo para el mecanizado de la aleaciones *Ti6Al4V* es el correspondiente a una  $V_c$  de 60 m/min y a un  $f$  de 0.1 r/min, debido a que un aumento del valor de ambos parámetros provoca cambios críticos tanto el material como el propia herramienta de corte (la fuerza de corte decrece debido a la ductibilidad del material). Estos cambios se encuentran relacionados con la propia naturaleza termomecánica del corte. Dichos resultados permiten equilibrar tanto los valores de fuerza de corte como la calidad de la propia herramienta de corte, garantizando un mayor rendimiento del proceso. En cambio, a menores valor de  $V_c$  y  $f$ , el mecanizado muestra una inestabilidad mayor (un sobre esfuerzo) causado por la propia resistencia que muestra el material.
30. Se han representado los resultados obtenidos de forma experimental de  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $VB$  y  $AB$  mediante una gráfica que muestran sus tendencias de forma global, identificando la influencia con respecto a los rangos establecidos en cada bloque de trabajo ( $V_c$  y  $f$ ).

31. Se ha caracterizado la aleación *Ti6Al4V* (UNS R56400) a través de los aspectos geométricos de la viruta, el desgaste en la herramienta de corte. Dichos parámetros son considerados como indicadores factibles relacionados con la maquinabilidad del material.
32. Se han establecido modelos paramétricos de tipo potencial, los cuales están relacionados con los aspectos físicos de la viruta y las fuerzas obtenidas. Estos modelos han reflejado una gran influencia del parámetro  $f$ . Esto se debe particularmente a la propia geometría de corte. En cambio, en lo que corresponde a la tendencia relacionada con la geometría de herramienta de corte, el parámetro con mayor influencia es  $V_c$ .
33. La metodología propuesta puede ser aplicada para el análisis de otros materiales metálicos, adaptando ciertos aspectos a las características propias de la viruta obtenida en el mecanizado de esas aleaciones.

### 6.3 Líneas futuras

Todo trabajo de investigación tiende a proyectar y trazar futuras líneas de interés por descubrir. Por ello, esta tesis doctoral incluye esta opción. En lo que concierne a este tema, se exponen a continuación las diversas vertientes de interés que permitirían extender un nuevo panorama encaminado al mecanizado de aleaciones ligeras, que en esta tesis se ha orientado particularmente a la aleación *Ti6Al4V* (UNS R56400). Se proponen las siguientes líneas temáticas de interés por explorar en una mayor dimensión:

1. Incluir una nueva variable de estudio encaminada a conocer los diversos cambios provocados a distintas profundidades de corte; es decir, ampliar el rango de valores en  $ap$  (ancho de pared de la corona de trabajo), para identificar el grado de afectación de dicha variable en función de los otros parámetros tecnológicos de trabajo, en este caso  $V_c$  y  $f$ .
2. Dada las múltiples variables que conlleva la caracterización del mecanizado del *Ti6Al4V* y la propia limitación en cuanto a equipamiento, tiempo y coste, en este estudio se limitó el número de variables de análisis a considerar. Por ello, podría ser conveniente extender dicho estudio para analizar el comportamiento de la viruta y de la herramienta de corte, mediante el uso de técnicas de microscopía electrónica de barrido (*SEM* como *EDS*), permitiendo identificar aspectos adicionales en relación a los efectos sufridos en su microestructura causada por el mecanizado.
3. Proponer el desarrollo de un estudio sobre el mecanismo de formación de viruta mediante elementos finitos modelados en 3D, en relación a los factores tecnológicos, comparando la influencia a diversos ángulos de corte y los cambios de temperatura generados por el propio corte. A su vez, compaginar los efectos del mecanismo de formación de la viruta en correlación a los parámetros de corte.

4. Conocer los posibles efectos de desgaste sufridos por distintos tipos de herramienta de corte (con y sin recubrimiento) durante el mecanizado de esta aleación, permitiendo identificar su implicación en la economía de los procesos de mecanizado.
5. Analizar en profundidad la posibilidad de recrear una nueva metodología para el estudio del desgaste generado en la herramienta de corte; aplicando la técnica de microscopia de foco variable (*FVM, Focus Variation Microscopy*).
6. Caracterizar otros materiales de interés en el sector aeronáutico, mediante ensayos comparativo bajo las mismas condiciones de trabajo, procediendo a evaluar la maquinabilidad de ambos mediante las variables de estudio consideradas en esta tesis: aspectos geométricos de la viruta, geometría de corte, fuerzas de corte y desgaste de la herramienta.
7. Emplear la señal eléctrica emitida por el consumo eléctrico del motor como posible indicador de la potencia de corte y establecer una alternativa de análisis.





# SUMMARY

---

## THESIS ENGLISH SUMMARY

*Methodology of characterization of machining process of light alloys using in aerospace sector by analysis of the mechanisms of chip formation.*

---





## E.1 Introduction

Recently, numerous studies have investigated the development trends in conventional design in air transportation. The last decades many researchers have focused studies on materials performance based in understanding of industrial experiments about the relationship establishing cause as effect on between manufacturing and the evolution of structural materials [1], with relation of the improvement in the manufacturing technologies for the aircraft sector [2, 3]. The technological leadership of this industry is related to the use of light alloys (magnesium, aluminum and titanium alloys) and other materials, such as laminated hybrids. The impact on the development of these materials has been associated with weight ration reduction in some parts of the vehicle and the improvement of the tensile strength that approaches or exceeds those of high strength structural steels (e.g. integral structure of aircraft) [4]. Currently, most of all mechanical components manufactured in the aircraft sector are produced through metal cutting (one of the most used techniques and oldest). For that reason, there is industrial interest on analyzing the advances of the machining process, because they influence increase of productivity during aircraft manufacture by reducing costs and its environmental impact.

The improvements are focused on optimizing the machining operations during the production of some metallic components (e.g. turning, drilling, milling or grinding) before to be assembled through of preventing the generation of obstacles during assembly (chip formation). At the same time, the aim is to obtain pieces with a good dimensional precision and a high quality surface level, which results can contribute to improved performance, reduced operating costs. For this reason, one objective of this study is considering evaluate the influence of dry machining process as competitive strategy. Consequently, the use of this process requires a thorough understanding of the interrelationships which link the process, tool and workpiece as a function of chip geometry. Moreover, it should be noted that appraisal of the chip morphology is important to analyze because can influence the functionality of components as effect of productivity of process and can cause injuries [5, 6].

## **E.2 The State of the Art: Chip morphology and machining process (light alloys).**

This investigation describes a review of basic terms with base scientific research to know the most influences components on the cutting process. In this case, the effects of chip formation and their influences on cutting forces and tool geometry have also been mentioned.

In this respect, it is important to mention of chip formation term is an important features of metal machining and yield important information on the cuttings process. The term morphology of the chip has been used since the last century by Ernst and Merchant [7] who formulated and classification the shape of the chip. Later on, different group of researchers as *CIRP* with view to evaluating another part of chip control of industrial applications [8, 9]. The attention was to understood the practical variations of the input parameters of the machining process, for example the influence of work material, geometry of cutting process, surface finish, tool life, type and form of chips, etc. This is why the investigating line for this thesis has been interested to knowledge of basic chip geometry and the influence in turning process following different techniques according of some scientific researchers as [8, 10-15] in which introduced an empirical approach to orthogonal cutting theory and chip morphology.

Another relevant factor the recent decades, was to optimize tool life so many researchers have focused to analysis the tool wear by indirect monitoring (e.g. acoustic emission, cutting forces, vibrations) that plays a significant role in control and improvement of product during of machining operations (in real time to prevent instabilities of process) and the relation with chip formation. For this reason has been selected of some contributions about this term [16-19] who can help to characterization of wear mechanisms with respect of machining conditions for this study.

One of topic of this study focus on the reviews of experimental influence of cutting force has considerable effects on the tool life and relation with chip formation [20-26]. The researchers observed the important to know on the evolution of the cutting force during the cutting process because could be help to explained the effects of thermal softening (the degree of the deformations) of the material at the moment was cutting it. To knowledge of value of the cutting force also serves to be control of cutting power assessment. This parameter can be necessary to determine best ranges of cutting parameters as a function of tool wear criteria.

On another hand, the titanium alloys are one of the most commonly employed materials for aircraft market and form part of the lightweight materials group used for to face the challenge of air transportation because of their properties, such as low density, high strength, ductility, toughness, resistance to fatigue and excellent recycling potential [27-29]. However, these alloys have extremely high tendency to adhere during cutting process and causing a potential risk that can lead to tool breakage and interruption of process.

The alloy *Ti6Al4V* have been widely used as structural materials in aircraft industries, employed in manufacture for fuselage, stringers, and wing skins. On the negative side, Ti alloys tends to be hard machining due to their mechanical properties such as low thermal conductivity and modulus of elasticity causing increase cutting temperature, tool breakage or possibility interruption of process [30]. Currently, there are few studies focused to analysis this alloy, most of them has been evaluated by the machinability of material through cutting forces, as well as the tool wear in relationship with quality of machined surface and accuracy of the workpiece as in the simulation of the cutting process [31-38].

### E.3 Experimental

This experimental study was designed to evaluate behavior of material *Ti6Al4V* with chemical composition shown in Table E.1 and supplemented by annex I, during cutting process to determine the main influence on the chip morphology under certain conditions generated on the first stage of machining.

**Table E. 1** Composition of *Ti6Al4V* (wt%).

	C	Fe	N	O	Al	V	Ti
<b>Piece</b>	1,89	0,164	0,05	0,05	5,47	4,09	Rest
<b>Standard</b>	0,08	0,25	0,05	0,02	5,5-6,76	3,5-4,5	Rest

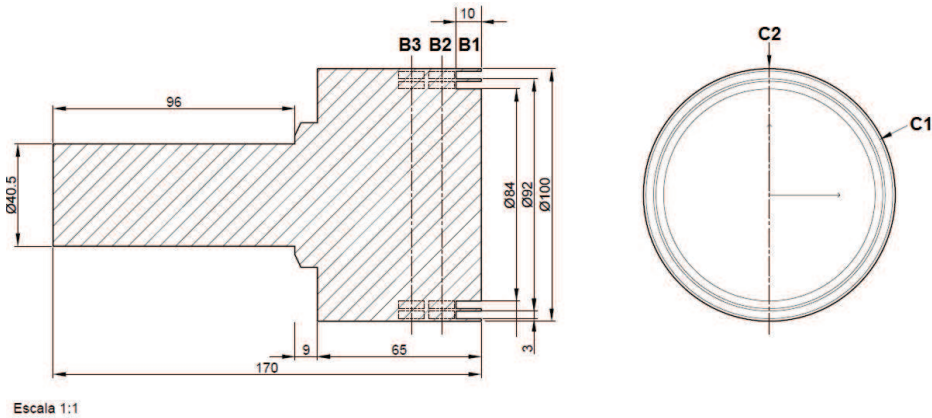
Experimental work was conducted in order to study the effect of cutting parameters. In particular with feed rate,  $f$ , cutting speed,  $V_c$  and keeping constant the variable like cutting depth,  $ap$ . This variable was justified by recent studies which demonstrate that  $f$  have most influence in chip morphology. For this experiments has been employed these cutting parameters, see Table E.2.

**Table E. 2** Cutting Parameters.

<b><math>V_c</math> [mm/min]</b>	30	45	65	80	100	125
<b><math>f</math> [mm/r]</b>	0,05	0,1	0,2	0,3		
<b><math>ap</math> [ mm ]</b>	1					

The cutting experiments a device was specially developed to reproduce the chip geometry side flow during dry turning test by geometry orthogonal conditions using as flexible workpiece such as a tube (cylindrical bar), see Figure E.1. The significant of this design was selected for two reasons: to achieve different ranges of cutting speed, feed rate and to the other hand to produce orthogonal cutting.

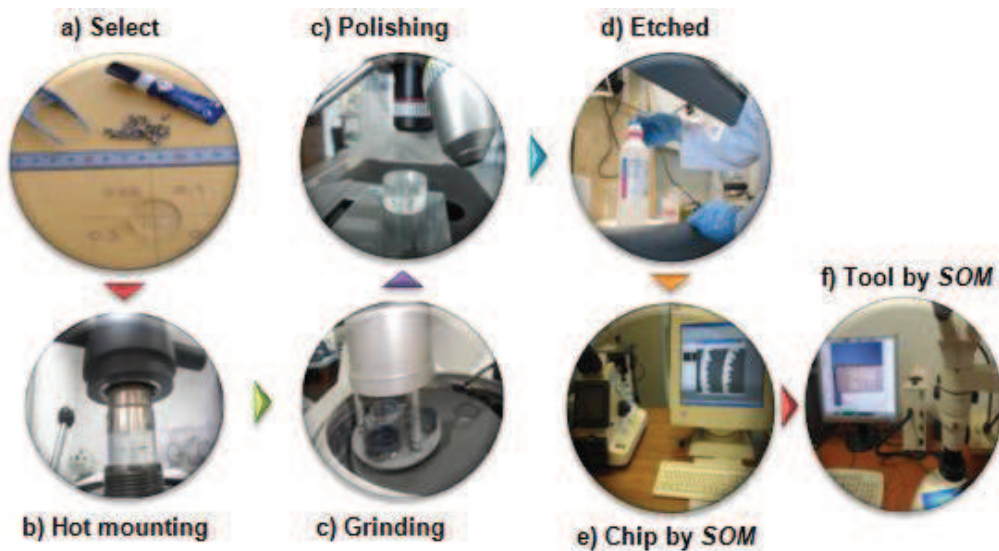
Orthogonal cutting test were performed by three cutting sections (B1, B2, B3). Each section have two discs (C1,C2) with a width 1 mm (machined surfaces, called  $ap$ ) to represent the range one of them according to cutting speed and the diameter of the workpiece. The design of workpiece has been supplemented by annex II.



**Figure E.1** Shecmatic desing of workpiece.

The tests were carried out in a parallel lathe Pinacho S-90/180, with tool insert from SECO supplier (TCMT16T308-F1 of coated TP2500) whose geometry cutting is close to orthogonal cutting. In order to maintain the same initial conditions were used new tools in each cutting test, and the same time, some samples of the chip were collected after cutting. First step the chip morphology and tool characterized by geometrical measurements used monitoring system. In this case, was monitored by using a Olympus Stylus SH-60 Digital Camera (*ON LINE*) and the dimensional of chip was measured by an optical microscope NIKON model Optiphot 280 serie 460774, Kappa Image Base camera model CF11 DSP (*OFF LINE*) for this step was necessary to using metallurgical processes.

The methodology has to following the next steps: a) selection of chip, b) mounting in epoxy resin, c) mechanical grinding, d) polished to reveal their sections and the last step was: d) etching with Kroll's reagent ( $50 \text{ ml H}_2\text{O} + 2 \text{ ml HF} + 5 \text{ ml HNO}_3$ ) for 20 seconds. See Figure E.2.



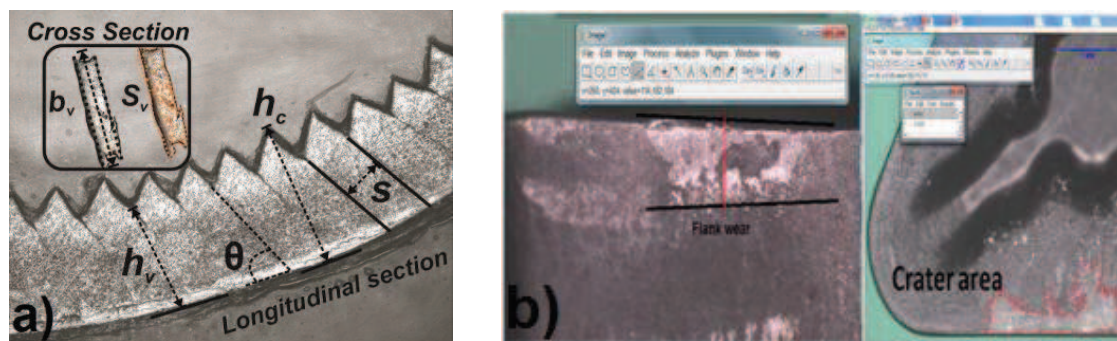
**Figure E.2** Metallurgical setup.

Finally, in this section was used image processing techniques as *SOM* (*Stereoscopic Optical Microscopy*) which help to characterized and determined the geometry chip and



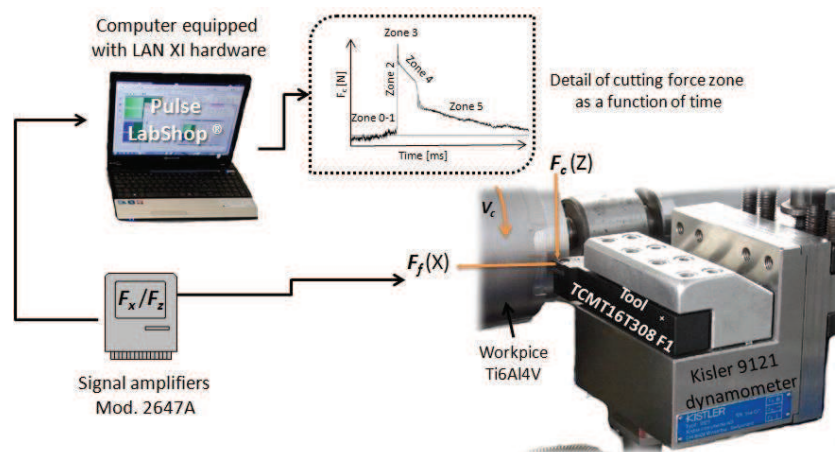
tool wear. And have been generally evaluated at some points (e. g. appearance and dimension) using the ISO 3685:1993 standard and UNE 16148 [39, 40]. The images were processing by ImageJ program (commercial software). However, it must be stated that slight adjustments were made based on the characteristics of the material studied.

Figure E.3 a) shows the parameters measured on the chip longitudinal and cross section: height of peak  $h_c$  [4] and height valley  $h_v$  [4], and chip section calculated by the distance between peaks  $S$  [4], the sliding angle  $\theta$  [°] on the chip. Finally the chip area  $S_v$  [mm<sup>2</sup>] and chip thickness  $b_v$  [4]. Another parameters possible of calculate by indirect form is the shrinkage factor  $\zeta$  and degree of segmentation chip  $G_s$ . And Figure E.3 b) show the region of interest location of line across the flank wear  $V_B$  [4] on the tool.



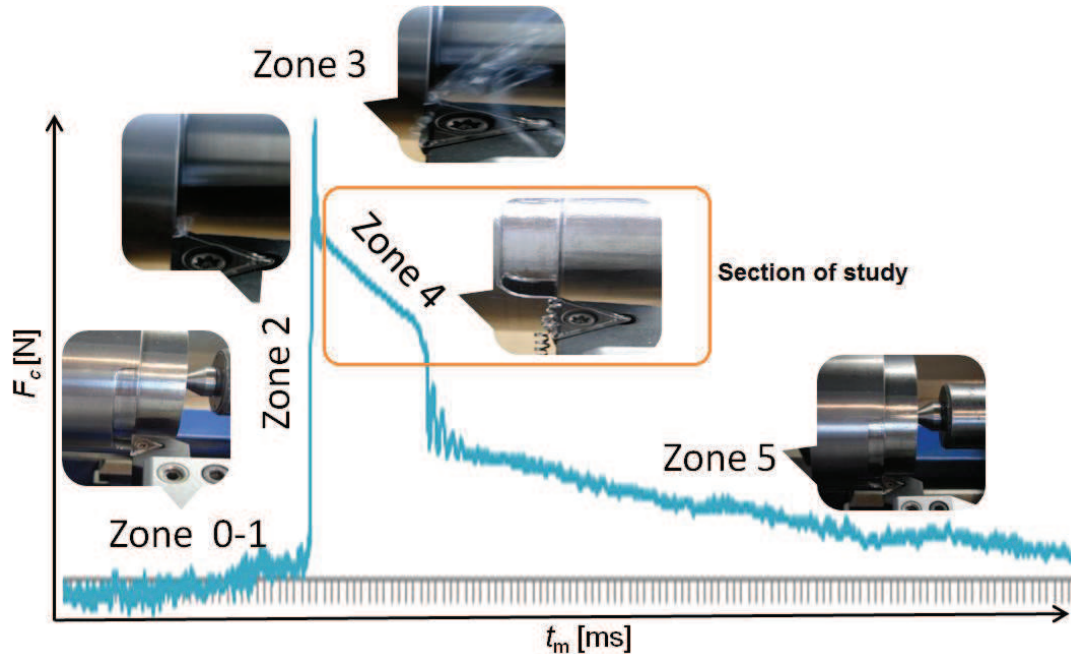
**Figure E.3** Parameters measured: a) chip and b) tool wear using SOM technique.

In another hand, this investigation focused into understanding by empirical analysis for tool wear monitoring in machining of *Ti6Al4V* alloy. In this case by analyzed the cutting force  $F_c$  and feed force  $F_f$  which were monitored by a piezoelectric a range 10 kHz, attached to a charge amplifier and for data acquisition was used *Pulse Labshop* software by Brüel & Kjær®. It is important to mention the cutting phenomenon in this case the cutting force as a function of the time to be filmed requires a short exposure time of the order of a few microseconds according to design of cutting process (see Figure E.4). The procedure of data acquisition has been supplemented by annexes III to V.



**Figure E.4** Orthogonal cutting setup.

In order to characterize the temporal evolution of the cutting forces exerted in the first stage of the machining (known as Quasi-Steady-State), it is necessary to analyze the amplitude of the extreme signal corresponding to the shearing force caused by the initial impact of the tool. For each tests were performed a graph is generated that represents the evolution of the cutting forces as a function of machining time (see Figure E.5).



**Figure E.5** Typical variation of  $F_c$  records.

Figure E.5 shows the early stages of the process, 5 zones of study are identified: Zone 0-1, correspond to the time when the piece travels through the section known as relief  $t_d$ , coinciding with the first cutting instants (transient period); Zone 2, to represents the time interval  $t_2$  in which the first significant changes of  $F_c$  are generated, until the maximum point is reached; Zone 3, display the maximum value of the forces during cutting process  $t_3$ ; Zone 4, limits the quasi -stable force interval to an instant before the end of the cut  $t_4$ ; Finally, the Zone 5, represents the final stage of cutting process  $t_5$ . Therefore, the total machining time  $t_m$  is represented by the sum of the times consumed in these five zones.

As shown in Figure E.6 an example of cutting tests records. For each experimental test, typical plots, the time records of cut and cutting force are shown the average values of 10 cuts under the same cutting conditions (one range of  $f$  and  $V_c$ ). This result includes minimum values, mean and maximum. At the same time in this plots can see only for  $F_c$  detail for the zones and each zone explain the scale of measurement.

In this investigation has been considered to the Zone 4 (to eliminated the effect of the beginning and the exit of the cutting tool), the forces were determined by means value obtained in the tests performed in that zone, these information been supplemented by annexes VI and VII.

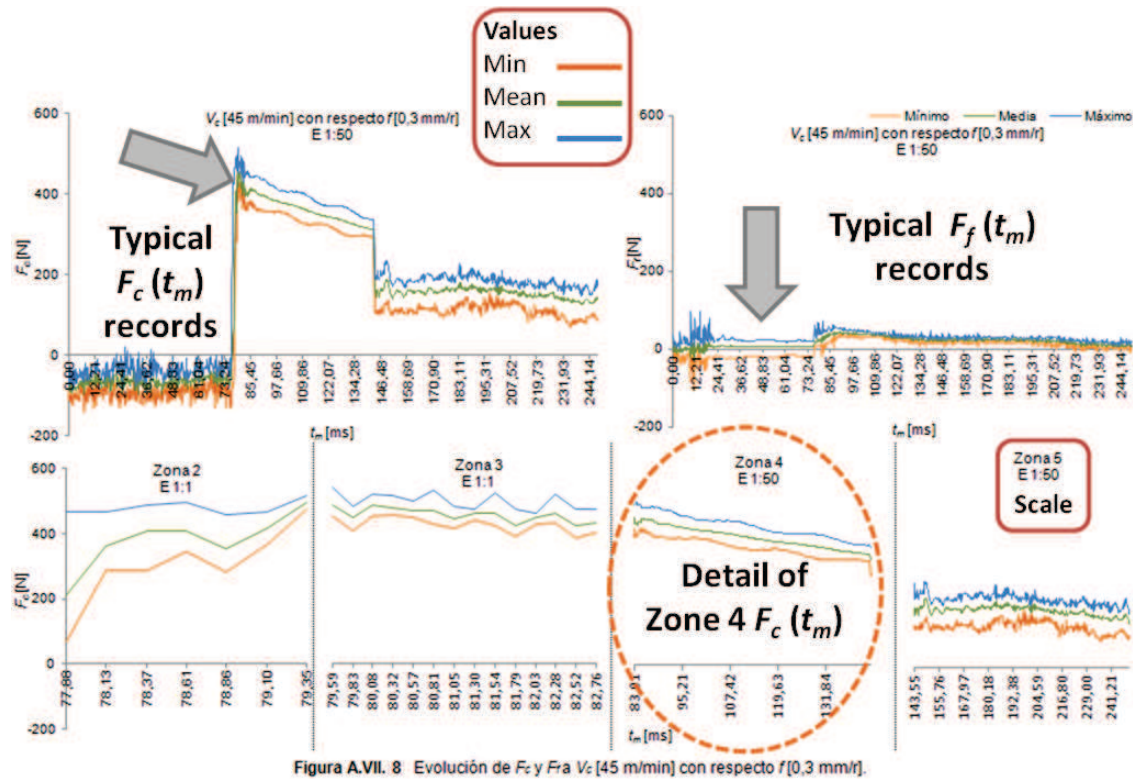


Figure E.6 Typical spectrum records of  $F_c$  and  $F_f$  (only for  $F_c$  detail for the zones).

However, the Figure E.7 shows the amplitude variation of feed force  $F_f$  caused by the contact with the chip, so its value represented around the 10% compared to maximum value of  $F_c$  in Zone 4.

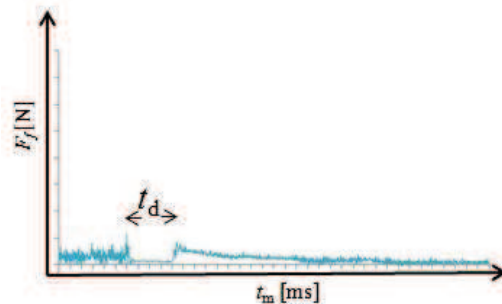


Figure E.7 Typical variation of  $F_f$  records.

The results of Figure E.6 and Figure E.7 show typical transient force response of tool. However, the average spectrum of quasi steady state value is filtered by high frequency complements in this case used LAN XI hardware and different trigger depends of speed range. The spectrum is very usual of structural dynamics behavior.

#### E.4 Results and discussion

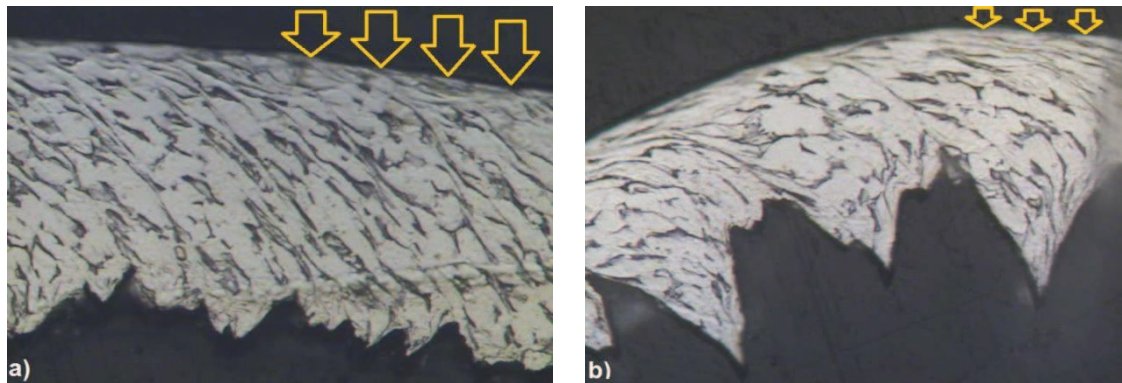
This study aims to better understand the chip morphology and its evolution through a systematic study of titanium alloys ( $Ti6Al4V$ ). Besides better understanding toward chip formation mechanism which can be good and convenient indicator of tool wear in



machining process. Also, the knowledge on the cutting force evolution can improve manufacturing productivity where tool wear and workpiece dimensional accuracy need to be closely monitored.

#### E.4.1 Chip formation analysis

The chips obtained for different ranges cutting parameters ( $f$  and  $V_c$ ) to revealed that is good option to consider the longitudinal section for analyzed geometry of the chip and the cross section because helps to verify the thickness of the chip and to know the chip area. Another point for this part, it is appropriate to identify the grains on the chip if been deformed and also to detect concentrate directions narrow bands. These characteristics to help better understand of the effect of plastic deformation of *Ti6Al4V* alloy. The Figure E.8 show to compared of micrographs of chip (100x) have been cut into at a  $f$  de 0,05 mm/r and two ranges of  $V_c$ : a) 30 m/min, b) 125 m/min. The result showing differences between these chips were influenced by cutting speed parameter.





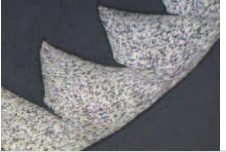







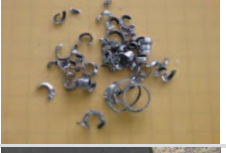
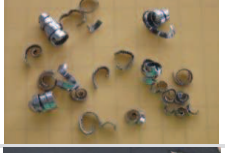
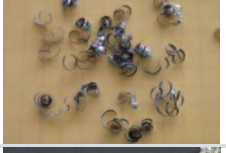

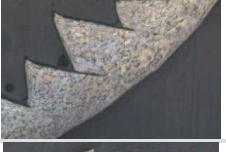









**Figure E.8** Micrographs of grain chip during experimental test of  $V_c$ : a) 30 m/min, b) 125 m/min.

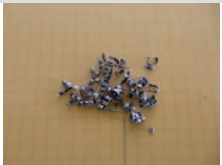
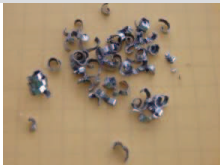










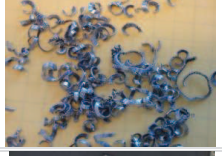
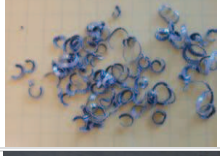
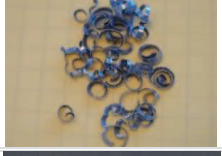

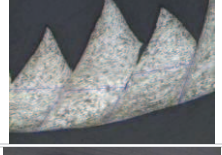





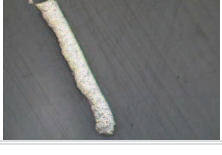
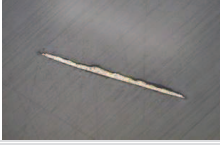
The experimental results shown on the Table E.3 on the first level, the trends of chip geometry with similar serrated appearance in compared to other materials. In generally, the chip morphology characterization of *Ti6Al4V* alloy according to different values of  $f$  and  $V_c$ , the preliminary assessment was represented is generally continuous helical type, since the alloy has a high level of plasticity.

However, the picture shown the experimental scenarios when  $f$  increase and also can be seen that a 0.3 mm/r the chip tends to be more fragment ability compared with 0.2 mm/r can be classified long tubular chip. In particularly, with 0.1 mm/r the chip is conical helical (segmented, more stable) on comparisons with other values, but the worst scenario, can be observed with low feed rate as is the case 0.05 mm/r, where chip is obtained in the form of tape with a tendency to form spiral chip snarled will be causing damage to the machined surface as the tool life. Furthermore, the last two levels shows images SOM 20x chip during machining. Thus, can do a preliminary assessment qualitatively was identify that increasing geometrical value. For this reason, is necessary to evaluate the microscale studies of the chip through to monitoring of the different methodologies which establish the optimal procedure for handling and data acquisition.

**Table E. 3** Micrographs of the different chip types produced during turning process.

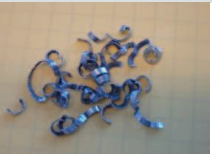









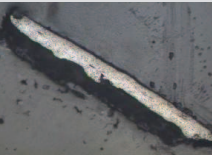






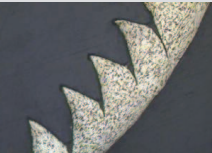




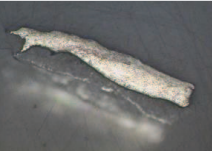

$V_c$ [m/min]		$f$ [mm/r]			
		0,3	0,2	0,1	0,05
Chip obtained in cutting process 1X	30				
SOM image (Longitudinal section) 20X					
SOM image (Cross section) 20X					
Chip obtained in cutting process 1X	45				
SOM image (Longitudinal section) 20X					
SOM image (Cross section) 20X					

Follow-up to the Table E.3

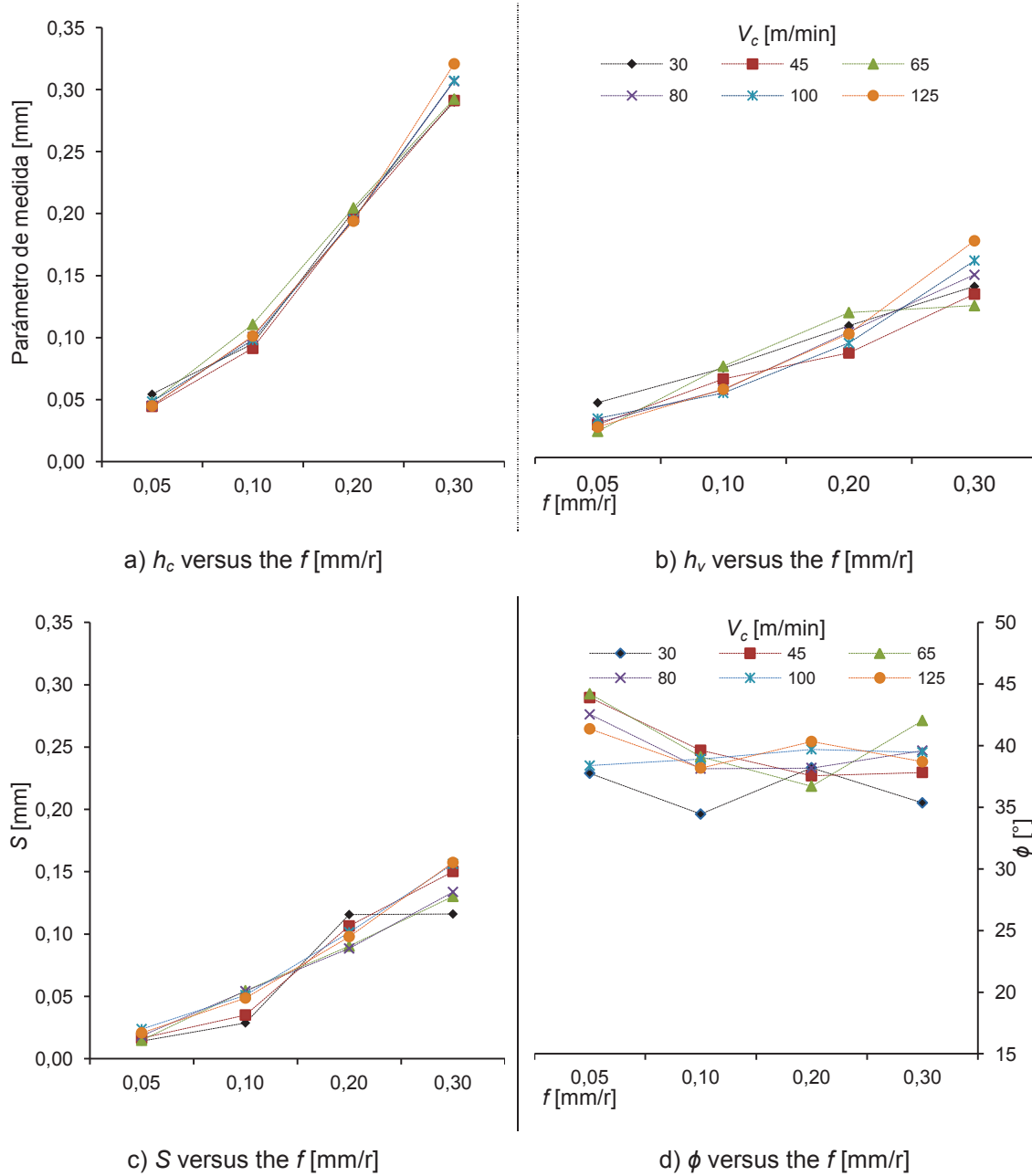
$V_c$ [m/min]		$f$ [mm/r]			
		0,3	0,2	0,1	0,05
Chip obtained in cutting process 1X	65				
SOM image (Longitudinal section) 20X					
SOM image (Cross section) 20X					
Chip obtained in cutting process 1X	80				
SOM image (Longitudinal section) 20X					
SOM image (Cross section) 20X					



Follow-up to the Table E.3

$V_c$ [m/min]		$f$ [mm/r]			
		0,3	0,2	0,1	0,05
Chip obtained in cutting process 1X	100				
SOM image (Longitudinal section) 20X					
SOM image (Cross section) 20X					
Chip obtained in cutting process 1X	125				
SOM image (Longitudinal section) 20X					
SOM image (Cross section) 20X					

The experimental results were shown in Figure E.9, can display the growth trend of all the geometry parameters on chip according to different values of  $f$  and  $V_c$ . In parameter  $S$  has gradually increased, indicating a dependence on the value of  $f$ , accompanied by a possible energy to condition the cut growth.



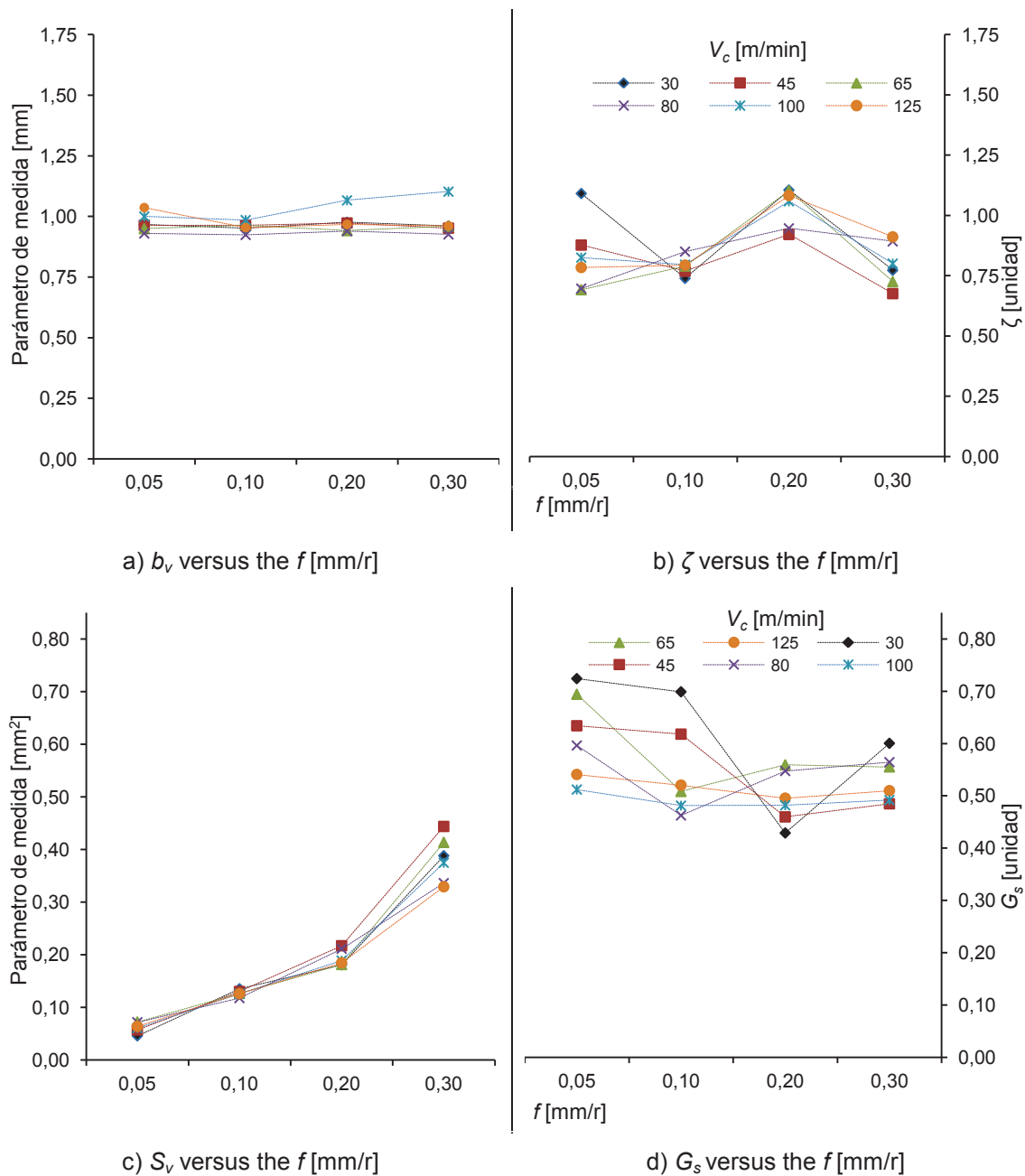
**Figure E.9** Chip geometry results: a)  $h_c$ , b)  $h_v$ , c)  $S$ , d)  $\phi$  by different range of  $V_c$  and  $f$ .

The last important point is to measuring the complementary of sliding angle  $\theta$  [°] on the chip, after that was measured can be calculating the shear angle  $\phi$  [°] by using equation (E.1).

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \phi \quad (\text{E.1})$$

The average values of shear angle are illustrated in Figure E.10 d). This angle determinate the position of the plane in which the material slips during machining and can observe a shear angle stability function  $f$  in which the average value ranging between  $40^\circ$  to  $41^\circ$ , this value indicates that actually applies where Stabler theory indicates that for a  $\lambda$  equal  $0^\circ$ , the shear angle can vary between  $10^\circ$  and  $45^\circ$ .

Figure E.10 a) shown the results of trajectory the width of chip  $b_v$  as a function of  $f$ , are slightly stable or constant. For that reason is verified the Stabler Hypothesis, so that the measured values should be close to those obtained in orthogonal cutting, as obtained some compression of the material during the cutting process by  $\zeta$ , with as result shown in Figure E.10 b).



**Figure E.10** Overall chip geometry results: a)  $b_v$ , b)  $\zeta$ , c)  $S_v$ , d)  $G_s$  by different range of  $V_c$  and  $f$ .

In order to conclude with the evaluation of the deformation of the material during machining  $\zeta$  was necessary to calculate by equation (E.2). This parameter possible of calculated by using by two variables of study  $S_o$  and chip area  $S_v$ .

$$\zeta = \frac{S_o}{S_v} \quad (E.2)$$

where,  $\zeta$  is the shrinkage factor,  $S_o$  cross section of chip before cutting to calculated by equation (E.3) and  $S_v$  after cutting.

$$S_o = ap \cdot f \quad (E.3)$$

where,  $S_o$  is the cross section of chip before cutting and  $ap$  is the depth cutting and  $f$  is the feed rate each experimental test.

On the Figure E.10 c) shows the cross section of the chip into relation with respect  $f$ . In another hand, was necessary to measure  $S_v$ .

And another important point of chip was tends to fragment, can see the resulting in differences in height between peak and valley, which is represented by the degree of segmentation chip  $G_s$  and a slight increase in chip segment, is also observed causing an oscillation in its deformation and indicates the possible thermal instability of the material to high values of  $f$  and shown in Figure E.10 d). The  $G_s$  which was calculated using equation (E.4).

$$G_s = \frac{h_c - h_v}{h_c} \quad (E.4)$$



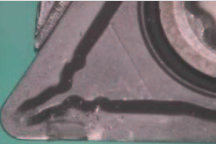




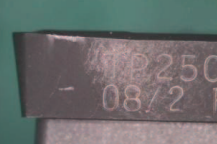






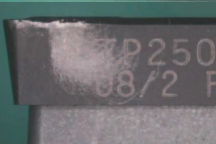

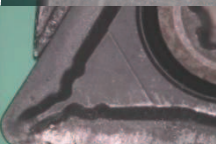
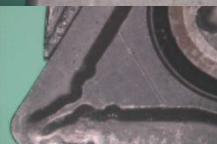

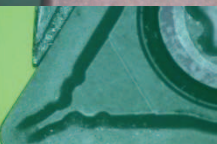
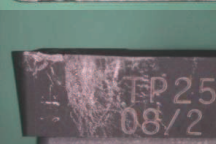



The last part was considered some relevant bibliography references with similarity to this experiment and was done comparison of the previous results of chip geometry during machining process [26, 41, 42].

#### *E.4.2 Tool wear analysis*

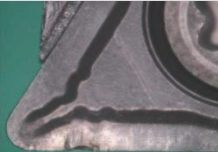




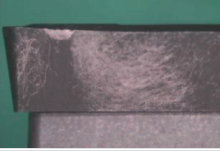

















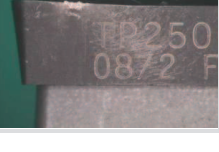
The physical mechanisms which produce of tool wear depend on the materials involved and the cuttings conditions specially the cutting speed. The purpose of this study is also to analyze and evaluated types of wear during cutting process by techniques SOM, shown on the Table E.4, whose result is evident, the tool wear progression in function of  $f$ . Another hand, this is due to increased efforts and pressures in the cutting zone, which facilitates the adhesion of the material to cause for thermo mechanical effects visualized on rake face of tool called Built Up Layer (BUL), displayed on the first level of table. Therefore, the wear appears when the geometry of chip is continuous form and causing stresses during contact with tool and has strong relation with cross section. In the case of Built Up Edge (BUE) their presence is unstable and caused by the formation of an adhesive layer of the workpiece caused by their ductility, shown second level of table.



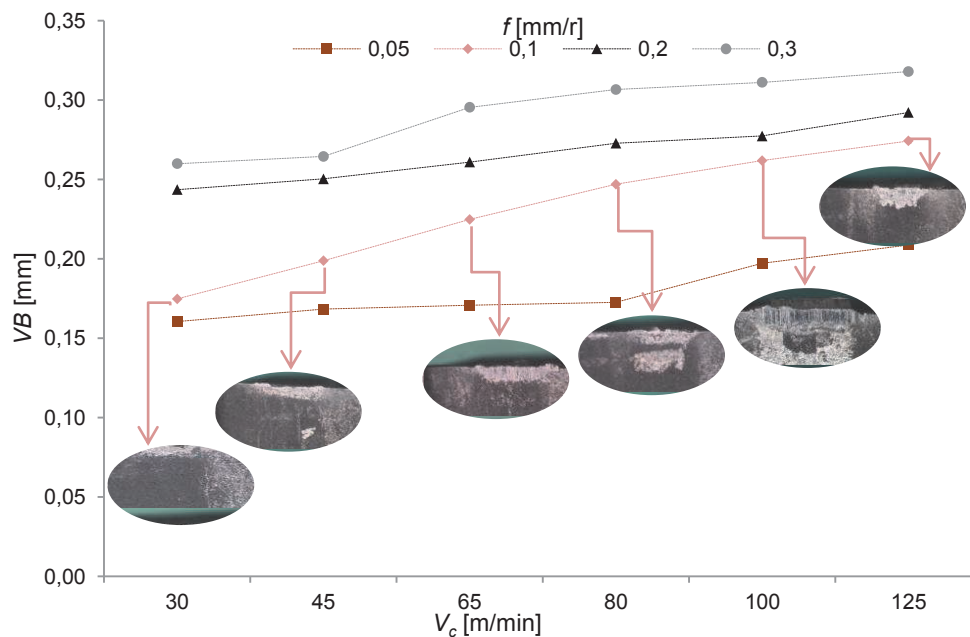
**Table E. 4** Images of wear mechanisms on tool rake and flank face during cutting process.

$V_c$ [m/min]		$f$ [mm/r]			
		0,3	0,2	0,1	0,05
30	Rake face				
	Flank face				
45	Rake face				
	Flank face				
65	Rake face				
	Flank face				

Follow-up to the Table E.4

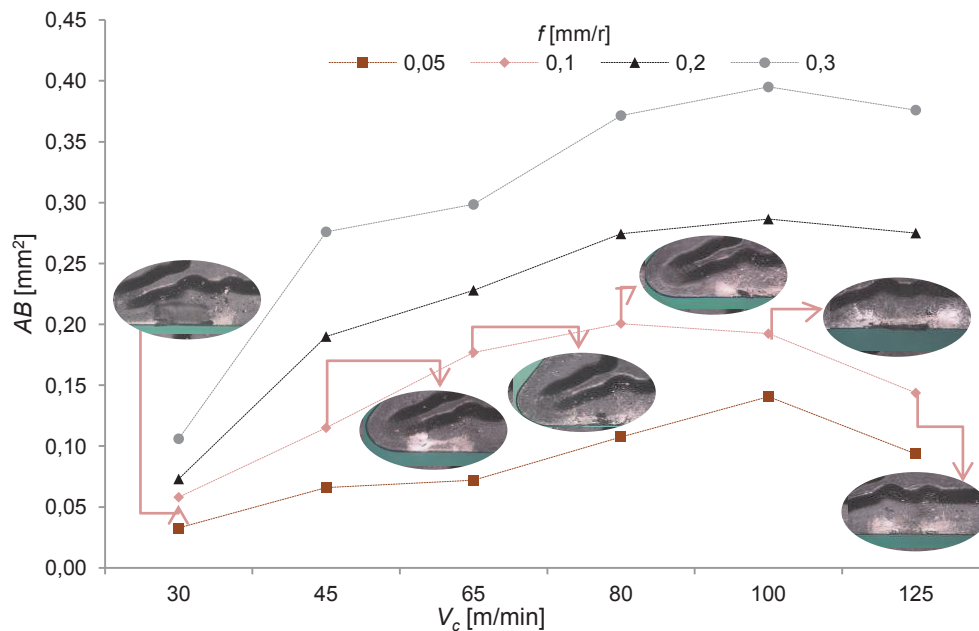
$V_c$ [m/min]		$f$ [mm/r]			
		0,3	0,2	0,1	0,05
80	Rake face				
	Flank face				
100	Rake face				
	Flank face				
125	Rake face				
	Flank face				

The magnitudes of measures of wear rate are shown in Figure E.11 and E.12.



**Figure E.11** Experiments results of flank wear  $V_B$  versus the  $V_c$  [m/min].

The Figure E.11 shown the experiments results are conducted in order to evaluated of the influence of  $V_c$  on  $V_B$  is analyzed, It is observed that at high values of  $V_c$  a 65 m/min, the cutting edge undergoes a progressive wear with value of 0.2 mm. The cause of this has been adhered material in the cutting edge. However, at moderate speeds of 30 m/min to 65/min the tool shows a certain stability and ability to withstand the stresses generated in the machining.



**Figure E.12** Experiments results of rake wear  $A_B$  versus the  $V_c$  [m/min].

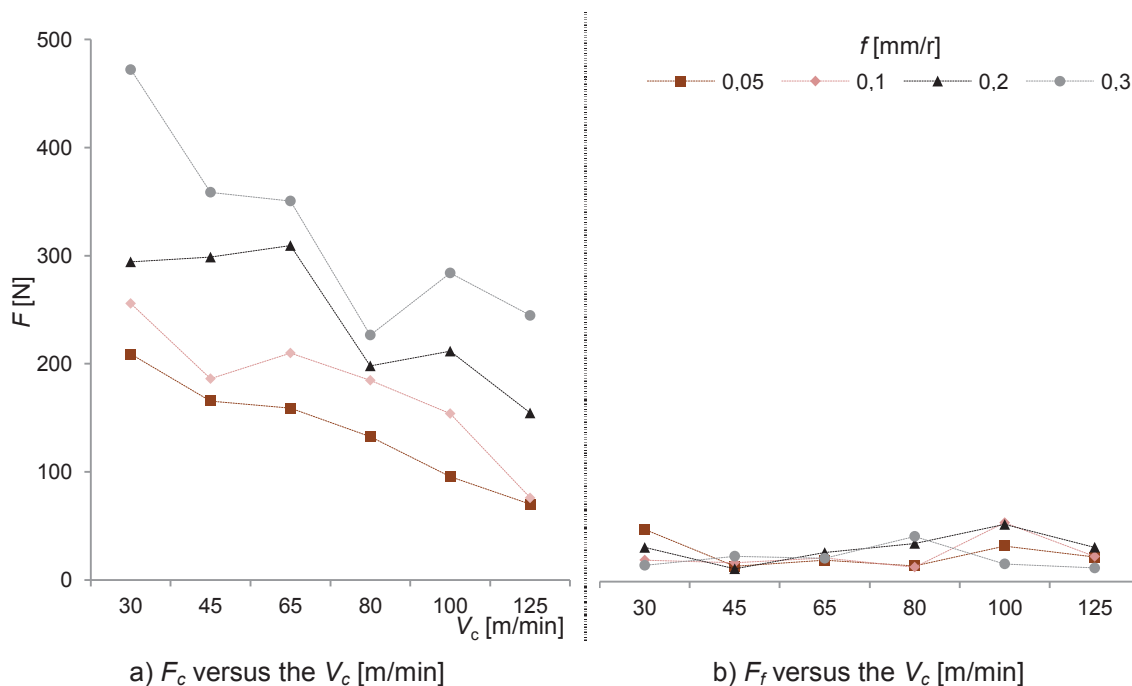
The Figure E.12 has shown the qualitative dimension of crater area ( $AB$ ) through measurements of under marks of adhesion on the surface of tool. This plot can help to

understood the relationship to increase of  $V_c$  and wear mechanism on the rake face. In this case, if the crater formation will be increase the effective rake angle of the tool can be affecting by material adhesion and chemical reactions and could cause to reduced cutting forces. Another important factor to consider is not to be work with high ranges for  $f$  or should be avoided for this alloy because it makes to increase the crater area usually the results are associated with chemical solubility of the chip and high temperature of cutting in that zone.

Both plots included the example of progressive images are included for a value of  $f$  a 0.1 mm /r for each values of  $V_c$ . The results have been evaluated of International Standards Organization Criteria [39, 40].

#### E.4.3 Cutting forces analysis

Finally, this part has been correlated that variations in the cutting force as function of cutting parameters. In this experimental investigation has been development of an *ON-LINE* tool wear monitoring system for *Ti6Al4V* turning operations. In this case by analyzed the cutting force  $F_c$  and feed force  $F_f$  which were monitored by force dynamometer. In the Figure E.13 shown the quasi-stable entities of the sampled cutting force and feed force. In this case was extracted as the mean only the zone 4 respectively as function of cutting parameters of each experimental test (cited of section E.3).



**Figure E.13** Experiments results of  $F_c$  and  $F_f$  versus different ranges of  $V_c$  [m/min].

The graph E.13 a) showing the variation of average (mean values)  $F_c$  versus different ranges of  $V_c$  and  $f$ . The trend of  $F_c$ , for the different values of  $f$ , goes from a minimum value of 13% and increase to maximum value of 30% according to increasing trend of  $f$

respect to the arithmetic average value between each range used in  $f$ . This indicates that  $f$  is a variable that influences the behavior of  $F_c$ .

In another hand, can be evaluated the tendency of  $F_c$  has been reduced considerably to respect of  $V_c$ , because the cutting temperature increases  $V_c$ , reducing the resistance of the material (thermal softening). Therefore, requires less effort in the tool.

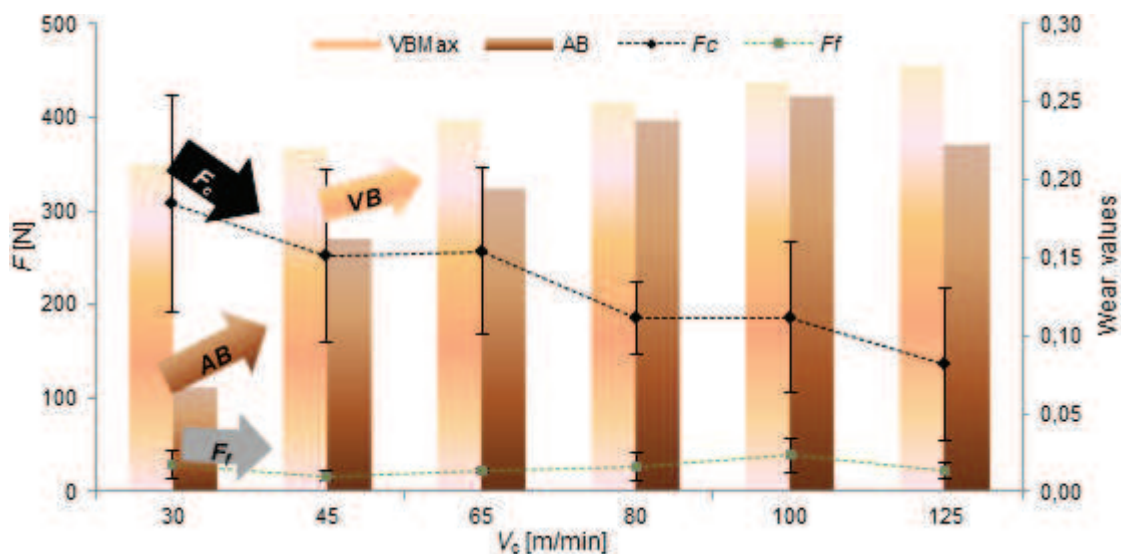
In compared to the Figure E.13 b) shows the values of  $F_f$  a declining trend over the 10% to 20% respect to the arithmetic average value of  $F_c$ . That mean the workpiece exerts greater pressure on the tool during impact on rake face, so the  $F_f$  is only affected by friction caused by friction of the chip in the flank of the tool.

## E.5 Other technical analysis

This point is considered to be analyzing another technical parameter into relation with the experimental results according to morphology of the chip and cutting forces obtained during machining process.

### E.5.1 Tool wear evolutions versus the cutting forces

However, since the relative increase of  $V_c$  the amplitude of  $F_c$  decrease which at the same time has an upward trend with respect to the  $VB$  and  $AB$  values. In contrast, the values of  $F_f$  have few alterations to respect of  $V_c$ . The results in Figure E.14 show range of rise of tool wear mechanisms and the relationship with the average value of  $F_c$  and  $F_f$ . This plot can explain the effect as the  $V_c$  is increased the adhesive and abrasive wear rates increases for some reasons. One of them is when increasing the  $V_c$  increase the cutting temperature and active the phenomenon of wear. Another reason is the chemical compatibility of titanium alloys; in this case *Ti6Al4V* has a low thermal conductivity and causes rapid tool deterioration.



**Figure E.14** Relationship between of  $F_c$  and  $F_f$  versus different types of tool wear  $VB$ ,  $AB$ .



According to the literature reviews [18, 26, 38] the modifications of the tool wear is associated with the appearance of shearing instability (changes of morphology of chip according to increase cutting parameters). This effect appears when overcoming level of plastic deformation of the material.

## E.6 Parametric Models

In this point widely referred to different some predict models to according to the values obtained through experimental test. The aim of this part is to evaluate the global form the influence of each cutting parameters to help characterization of machining process of *Ti6Al4V* alloy has been defined through by the evolution of the chip morphology, cutting force and tool wear. These parametric models will have a marginal structure that will allow the estimation of rationalized effects with input variables, as a function of different ranges of  $f$  and  $V_c$ , keeping the variable  $a_p$  constant (equation E.5).

$$\text{Interest parameter} = K \cdot f^x \cdot V_c^y \quad (\text{E.5})$$

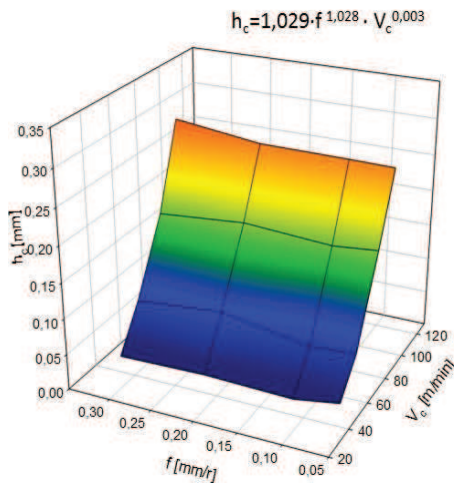
Where  $K$ ,  $x$  and  $y$  are constants. These values make up the result obtained by multiple linear regression adjustments, based on the following equation E.6.

$$\log(\text{Interest parameter}_{ap}) = \log(K_{ap}) + x_{ap} \cdot \log(f) + y_{ap} \cdot \log(V_c) \quad (\text{E.6})$$

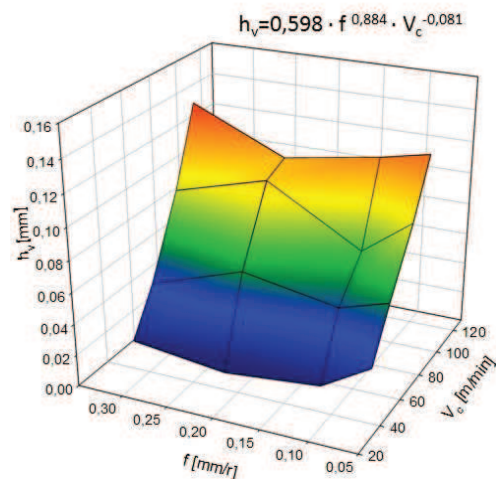
The following sections are subdivided according to the study parameter, as a function of  $f$  and  $V_c$ . These adjustable models will be represented in Annex VIII (Plots representative of adjusted models).

### E.6.1 Parametric Models of chip geometry

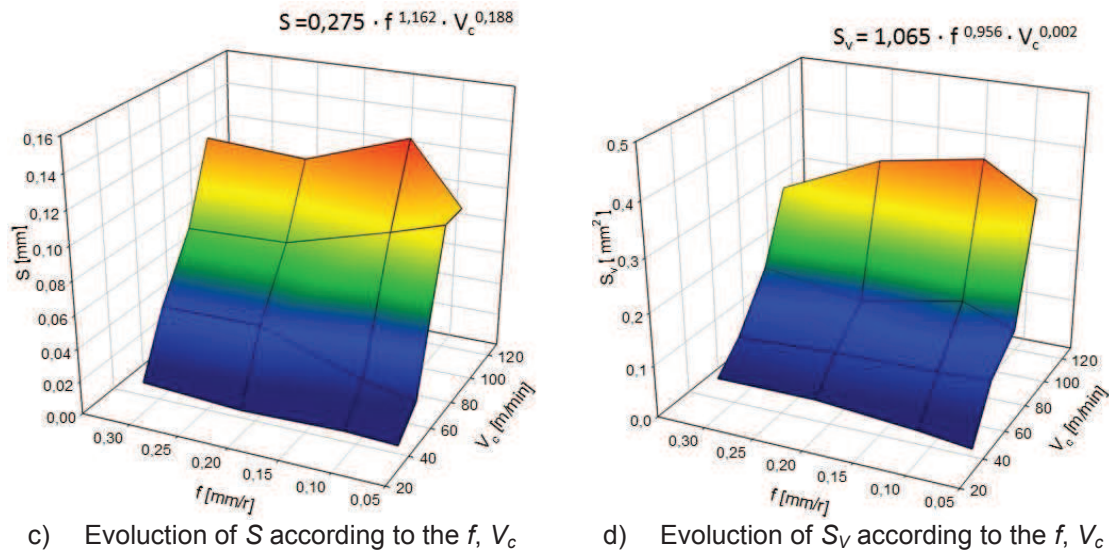
These experimental modeling is to permits to get the best ranges for cutting parameters ( $V_c$  and  $f$ ) from the obtained analytic equations in terms of geometry aspect of the chip.



a) Evolution of  $h_c$  according to the  $f$ ,  $V_c$



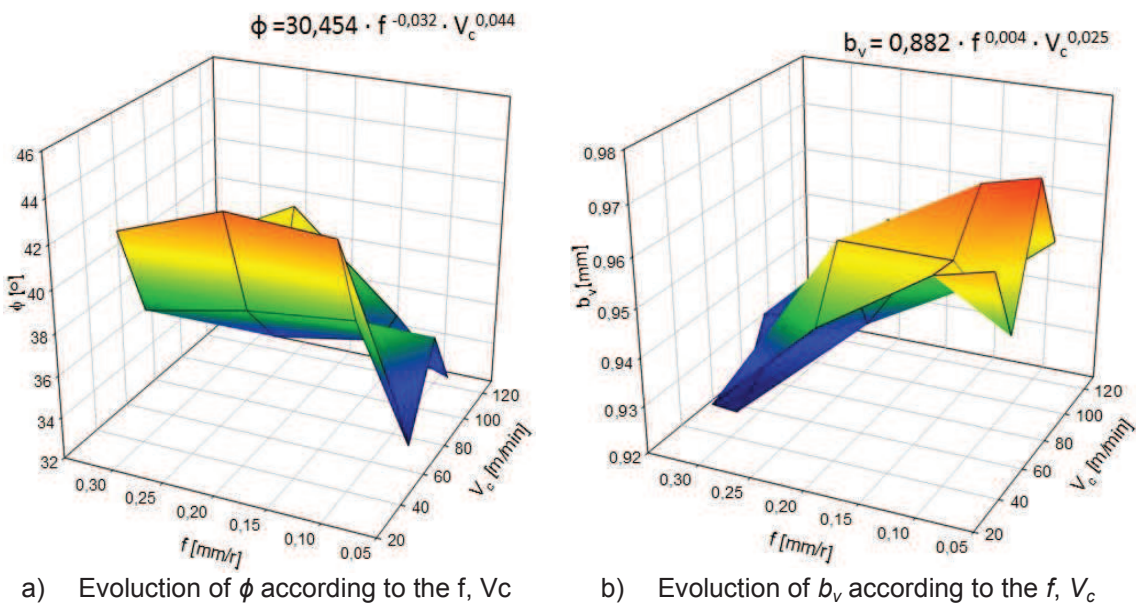
b) Evolution of  $h_v$  according to the  $f$ ,  $V_c$



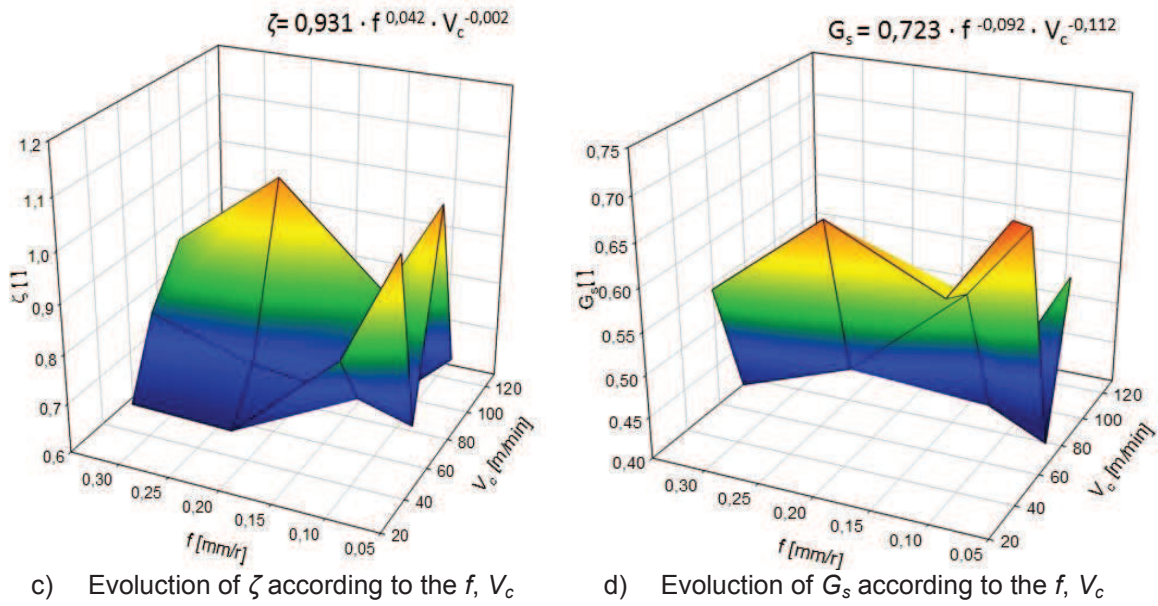
**Figure E.15** Parametric models of the chip. a)  $h_c$ , b)  $h_v$ , c)  $S$  y d)  $S_v$  as a function of  $f$ ,  $V_c$ .

The Figure E.15 represents the tendencies of  $h_c$ ,  $h_v$ ,  $S$  and  $S_v$  which depends strongly to  $f$  values and by comparing the  $V_c$  values show a low correlation. For these parameters can be associated with the mechanism of chip formation which depend directly on the  $f$  rate. The variations of these parameters can help to detect instability of cutting process.

In contrast, by analyzing Figure E.16, corresponding to  $\phi$ ,  $b_v$ ,  $\zeta$ ,  $G_s$  can be identified that the exponent of  $f$  is negative or lower, giving rise to a decreasing trend. However, the exponent of  $V_c$  is slightly larger, but equally insignificant compared to that of  $f$  to show a linear trend. The results have been associated to orthogonal cutting conditions that mean the variations for these parameters are minimum and uniform.



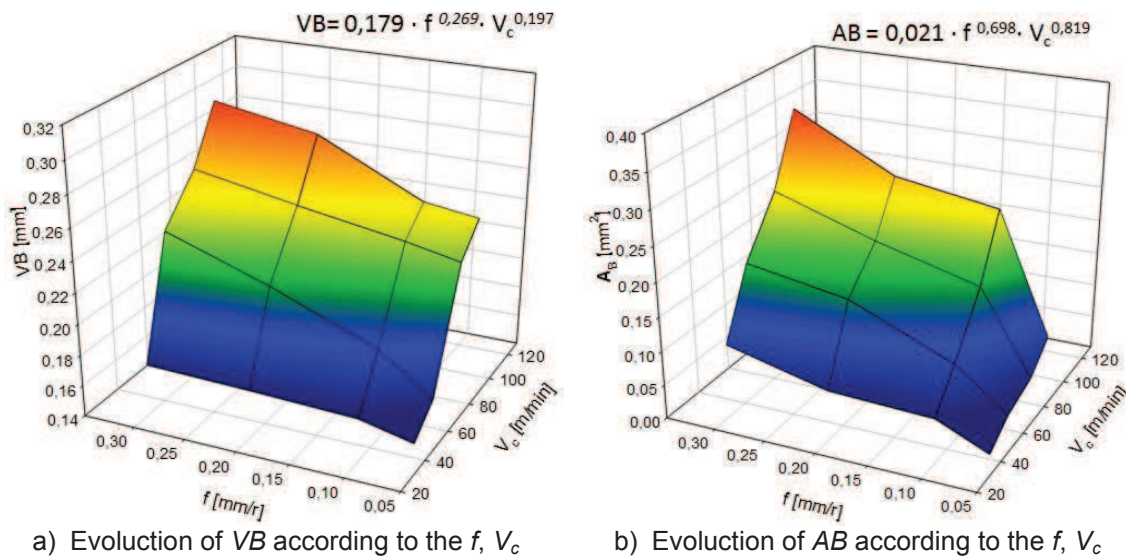




**Figure E.16** Parametric models of the chip. a)  $\phi$ , b)  $b_v$ , c)  $\zeta$  y d)  $G_s$  as a function of  $f$ ,  $V_c$ .

### E.6.2 Parametric Models of tool wear

The purpose of this part is to identify a model to predict the tool wear mechanism caused during machining of *Ti6Al4V* alloy. In the development of this experimental test it was identified that for a value of  $VB$  of less than 0.2 mm the tool shows a certain stability (little geometric affectation), which improves the machining. Therefore, this is a key point for determining the limits for the proposed model. However, if the force values obtained in each test are considered, it is observed that when the tool is fractured, a slight fluctuation in the  $F_c$  values and this effect is intimately influenced by the changes in  $f$ . In Figure E.17 showing the proposed model for the tool wear as a function of  $f$  and  $V_c$ .

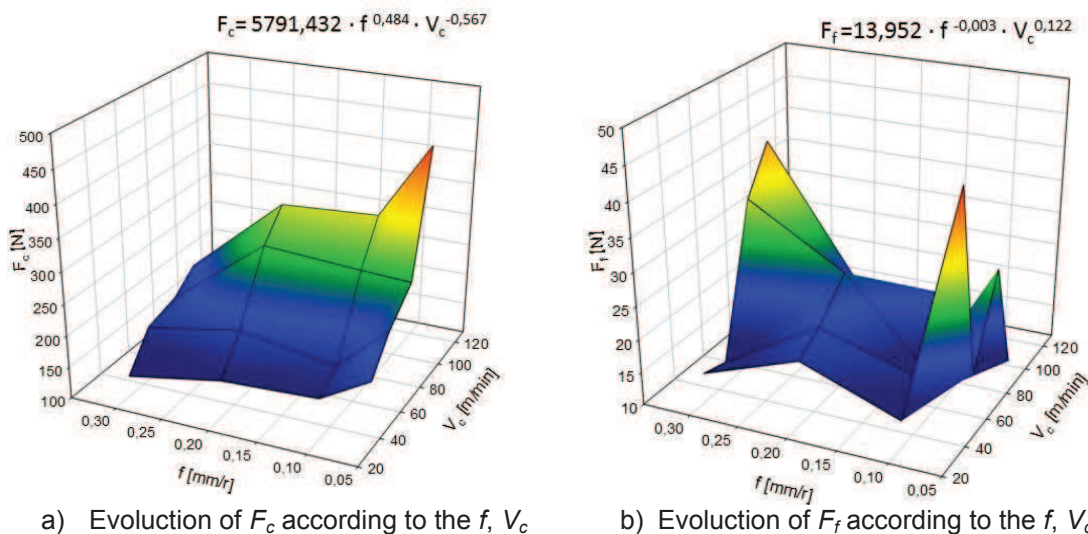


**Figure E.17** Parametric models of the tool wear. a)  $VB$  y b)  $AB$  as a function of  $f$ ,  $V_c$ .

The Figure E.17 relates the flank and crater wear area results of a combination of high cutting temperatures and high shear stresses most all them by titanium characteristics (Thermal conductivity, the solubility and reactivity). In this equation indicate the strongly dependent with  $f$  and  $V_c$  cutting parameters.

### E.6.3 Parametric Models of cutting force

This point is intended for the development of models to be able of predict of cutting forces related to the machining of light alloys by analyzing the turning operation with orthogonal cutting geometry.



**Figure E.18** Parametric models of the cutting forces. a)  $F_c$  y b)  $F_f$  as a function of  $f$ ,  $V_c$ .

In the Figure E.18 a) shows that the experimental data of  $F_c$ . The values of  $F_c$  are in increase as respect of ranges of  $f$ . In another hand as respect to  $V_c$  shown minimum dependence. Finally, if the proposed model for  $F_f$  is observed in Figure E.18 b), the values show low influence on the each work scenario to respect  $f$  and  $V_c$ .

The mathematic models help to identify the ideal combination of  $f$  and  $V_c$ . Because  $f$  is associated with the stability of the machining and  $V_c$  with the wear of the cutting tool, both affect cost and performance of cutting process.

In this case, a working range of  $V_c$  a 45 to 65 m/min for a  $f$  of 0,1 mm/r is considered as optimum conditions to titanium bases alloys because helps to control the rapid tool deterioration and minimize thermal shock cause of cutting process.

## E.7 Conclusions

The obtained results from the chip analysis during machining of alloy *Ti6Al4V* show the correlation between cutting parameters on chip geometry. In addition, the results obtained from experiment tests are found that:

- It has been possible to make an approximation the state of the art aimed at the morphological characterization of the chip during the turning process into relation with the technological cutting parameters. It has been possible to identify mathematical models applicable to the prediction of the behavior of the machining as a function of the parametric cutting technology; In this case, cutting speed  $V_c$ , feed rate  $f$ , as well as the depth of cut; For this study was considered constant,  $ap$ .
- Through this research, the technological demand related to the development of strategic materials for the aircraft sector has been identified. A special attention of light alloys, in this case with alloy *Ti6Al4V*. The importance of characterization during machining has also been emphasized and the various study techniques related to this topic have been identified through bibliographic references.
- A methodology has been developed to characterization of morphologically and geometrically the chip in the dry turning process of light alloys, special attention in the alloy *Ti6Al4V* into relation with cutting parameters. In this case, to evaluated of geometry of the chip according to the tool wear and cutting forces during the machining process.
- In this study, it was possible to design of geometry orthogonal cutting into flexible workpiece such as a tube. This design has made it possible to adapt to the material resources and the equipment established for this line of research.
- For this study, it was possible to adjust some methodologies applied in other materials. In this case, using by *SOM* (*Stereoscopic Optical Microscope*) and metallographic techniques.
- It has been analyzed and considered the use of metallographic techniques as a fundamental instrument for the characterization of the chip and the cutting tool, applying monitoring techniques *OFF LINE*.
- Several procedures have been established within the experimental procedures, applying the *ON LINE* monitoring technique, in order to acquire the effects generated in the process in real time by in frames and videos which has allowed us to graphically preserve images of each test and, as a result, to determine the degree of validity of the results.
- The data obtained, it has been possible to consider, as complementary lines, the macrogeometric evaluation of the chip in relation to cutting forces. The chip morphology of the fragmented sawtooth type has been identified as a function of different ranges of  $f$  as  $V_c$ . However, as  $f$  is increased, the thickness of the chip increases considerably, being related to the growth of shear forces required to remove said chip.
- Different geometric aspects of the chip (longitudinal and cross section) have been measured experimentally. In this case, the height of the peaks  $h_c$ , the height of the valleys  $h_v$ , the distance between valleys  $S$  and the complementary angle  $\theta$ , which have

been used to calculate the shear angle  $\phi$ , chip thickness  $b_v$  and chip area  $S_v$ , as well as two other indirect ones: the upset factor  $\zeta$  and the degree of segmentation  $G_s$ . All of them have been characterized as a function of different ranges of  $f$  as  $V_c$ .

- In the particular case of  $h_c$  and  $h_v$ , shown an increasing tendency related to the increase of  $f$ . These parameters, it has been possible to identify the thermoplastic instability suffered in the material during its machining.
- It was observed that  $f$  is the parameter has influences on chip geometry except on  $\phi$ ,  $b_v$ ,  $\zeta$ ,  $G_s$  (cause of design the experimental test) and strong relation to the tool life.
- According to the experimental results, the proposed methodology can provide and identify of chip geometry the alloy *Ti6Al4V* with respect to cutting parameters and also was validated the morphology of chip in relation to the ISO 3685:1993 and UNE 16148 standards.
- Through of experimental was possible to identify and understand that increased values of  $f$  the tool wear progression becomes larger, more unstable and can to adversely residual affect the machined surface and chip geometry.
- The low thermal conductivity of *Ti6Al4V* causes rapid tool deterioration, so important to detect the best range of cutting parameters according with wear mechanisms.
- Results for tool wear in this case flank wear has revealed promising candidate to control cost and performance of cutting process for *Ti6Al4V* alloy.
- This experimental test is proposed another option to obtain the natural frequency of cutting force and to permits to select the studies to relation with records obtained during of cut. The results have been compared and validated by studies obtained from bibliographical references.

## E.8 Future lines

All research work tends to project and future lines of interest to discover. Therefore, this doctoral thesis includes this option. As far as this subject is concerned, the different aspects of interest that allow to extend a new perspective for the machining of light alloys are presented below, which in this thesis has been particularly oriented to the *Ti6Al4V* alloy. The following thematic lines of interest to explore in a greater dimension are proposed:

1. Include a new study variable aimed at knowing the various changes caused at different depths of cut; That is to say, to extend the range of values in  $ap$ , to identify the degree of affectation of that variable in function of the other technological parameters of work, in this case  $V_c$  and  $f$ .
2. Given the multiple variables involved in the characterization of the machining of *Ti6Al4V* and the own limitation in terms of equipment, time and cost, in this study the

number of analysis variables to be considered was limited. Therefore, it may be useful to extend this study to analyze the behavior of the chip and the cutting tool, using scanning electron microscopy techniques (*SEM* as *EDS*), allowing to identify additional aspects related to the effects suffered in its microstructure caused by machining.

3. To propose the development of a study on the mechanism of formation of chips by finite elements modeled in 3D, in relation to the technological factors, comparing the influence at different cutting angles and the temperature changes generated by the cutting itself.

4. Know the possible wear effects suffered by different types of cutting tool (coated and uncoated) during the machining of this alloy, allowing the identification of its implication in the economics of machining processes.

5. Analyze in depth the possibility of recreating a new methodology for the study of wear generated in the cutting tool. Applying the technique of FVM (*Focus Variation Microscopy*).

6. Characterize other materials of interest in the aeronautical sector, by means of comparative tests under the same working conditions, proceeding to evaluate the machinability of both through the study variables considered in this thesis: geometric aspects of the chip, cutting forces and wear of the tool.

7. Use the electric signal emitted by the electric consumption of the motor as a possible indicator of the cutting power and establish an alternative analysis.



## References

- [1] D. King, O. Inderwildi, C. Carey. Advanced aerospace materials: past, present and future. *Aviation and the Environment*, (2009). 22-27.
- [2] M. F. Ashby. *Materials and the environment: eco-informed material choice*: Elsevier, (2012). ISBN:0123859727.
- [3] EREA. *From Air Transport System 2050 vision to planning for research and innovation. The association of European Research Establishments in Aeronautics*, Amsterdam, Holland, (2010).
- [4] J. P. Immarigeon, R. T. Holt, A. K. Koul, L. Zhao, W. Wallace, J. C. Beddoes. Lightweight materials for aircraft applications. *Materials Characterization*, 35, (1995). 41-67.
- [5] M. Ávila, J. Gardner, C. Reich-Weiser, S. Tripathi, D. Dornfeld. *Strategies for Burr Minimization and Cleanability in Aerospace and Automotive Manufacturing. Laboratory for Manufacturing and Sustainability. University of California, Berkeley*, (2006). 11.
- [6] J. Aurich, D. Dornfeld, P. Arrazola, V. Franke, S. Min. Burrs: Analysis, control and removal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, (2009). 519-542.
- [7] H. Ernst, M. Merchant. Chip formation, friction and High quality machined surfaces. *Transactions of the ASME*, 29, (1941). 299-328.
- [8] I. S. Jawahir. The chip control factor in machinability assessments: Recent trends. *Journal of Mechanical Working Technology*, 17, (1988). 213-224.
- [9] I. S. Jawahir, Van Luttervelt, C. A. Recent Developments in Chip Control Research and Applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42, (1993). 659-693.
- [10] V. P. Astakhov, S.V. Shvets, O. Osman. Chip structure classification based on mechanics of its formation. *Materials Processing Technology*, (1997). 247-257.
- [11] R. Komanduri. Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys. *Wear*, 76, (1982). 15-34.
- [12] R. Komanduri and B. F. Von Turkovich. New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys. *Wear*, 69, (1981). 179-188.
- [13] W. Grzesik. *Mechanics of cutting and chip formation in Machining of Hard Materials*. ed: Springer, (2011). 87-114.
- [14] B. Von Turkovich. Cutting theory and chip morphology in *Handbook of High-Speed Machining Technology*. ed: Springer, (1985). 27-47.
- [15] S. B. Salem, E. Bayraktar, M. Boujelbene, D. Katundi. Effect of cutting parameters on chip formation in orthogonal cutting. *Journal of Achievements in Materials and manufacturing Engineering*, 50, (2012). 7-17.
- [16] S. Dimla. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40, (2000). 1073-1098.
- [17] S. Kurada, Bradley, C. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. *Computers in Industry*, 34, (1997). 55-72.
- [18] L. C. Lee, K. S. Lee, C. S. Gan. On the correlation between dynamic cutting force and tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 29, (1989). 295-303.
- [19] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'donnell, D. Dornfeld. Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59, (2010). 717-739.

- [20] J. Q. Huang, X. M. Xiao. Identification methods for dynamic model of measurement systems. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1992. IMTC'92., 9th IEEE, (1992). 703-708.
- [21] M. Santochi, G. Dini, et al. A sensor-integrated tool for cutting force monitoring. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 46, (1997). 49-52.
- [22] A. A. Hamid, Y. Ali. Experimental determination of dynamic forces during transient orthogonal cutting. Journal of Materials Processing Technology, 55, (1995). 162-170.
- [23] S. Miyazawa, Y. Usui. Measurement of transient cutting force by means of a Fourier analyser. Precision Engineering, 7, (1985). 99-104.
- [24] P. A. Rosa, O. Kolednik, P. Martins, A. Atkins, . The transient beginning to machining and the transition to steady-state cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, (2007). 1904-1915.
- [25] S. Sun, M. Brandt, M. S. Dargusch. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49, (2009). 561-568.
- [26] G. Sutter, G. List. Very high speed cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy—change in morphology and mechanism of chip formation. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 66, (2013). 37-43.
- [27] C. Cui, B. Hu, L. Zhao, S. Liu. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. Materials & Design, 32, (2011). 1684-1691.
- [28] M. C. Gabriele. Titanium. The infinite choice: International Titanium Association, (2011). ISBN.
- [29] F. Nabhani. Machining of aerospace titanium alloys. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 17, (2001). 99-106.
- [30] G. Welsch, R. Boyer, E.W. Collings. Materials properties handbook: titanium alloys: ASM international, (1993). ISBN:0871704811.
- [31] E. O. Ezugwu, Z. M. Wang. Titanium alloys and their machinability—a review. Journal of Materials Processing Technology, 68, (1997). 262-274.
- [32] N. Narutaki, A. Murakoshi, S. Motonishi, H. Takeyama. Study on Machining of Titanium Alloys. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 32, (1983). 65-69.
- [33] A. Shokrani, V. Dhokia, S. Newman. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 57, (2012). 83-101.
- [34] S. J. Oosthuizen. Titanium: the innovators' metal - Historical case studies tracing titanium process and product innovation. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 111, (2011). 781-786.
- [35] M. Batista Ponce. Características de los mecanismos de adhesión secundaria y su influencia en el desgaste de herramientas de corte. Aplicación al mecanizado en aleaciones ligeras. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, (2013).
- [36] M. Calamaz. Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caractérisation de l'interface outil-copeau—Application a l'usinage de l'alliage de titane aéronautique TA6V. Université de Bordeaux. (2008).
- [37] J. M. Gerez Miras. Estudio del torneado en seco de la aleación Ti6Al4V. Relaciones paramétricas para el acabado superficial. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, (2014).
- [38] A. Daymi, M. Boujelbene, S. B. Salem, B. H. Sassi, S. Torbaty. Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces. Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering, 1, (2009). 77-83.



- [39] ISO 3685:1993 Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools. Genève, Switzerland, (1993).
- [40] AENOR 16148:1985 Ensayos de duración de herramientas de torno de corte único. Madrid, España, (1985).
- [41] M. Batista, M. Calamaz, F. Girot, J. Salguero, M. Marcos. Using Image Analysis Techniques for Single Evaluation of the Chip Shrinkage Factor in Orthogonal Cutting Process. *Key Engineering Materials*, 504, (2012). 1329-1334.
- [42] M. Batista, J. Salguero, A. Gomez, S. Fernández, M. Marcos. SOM based Methodology for Evaluating Shrinkage Parameter of the Chip Developed in Titanium Dry Turning Process. *Procedia CIRP*, 8, (2013). 534-539.



# ANEXO I

---

## INFORME METALOGRAFICO DE TI6Al4V

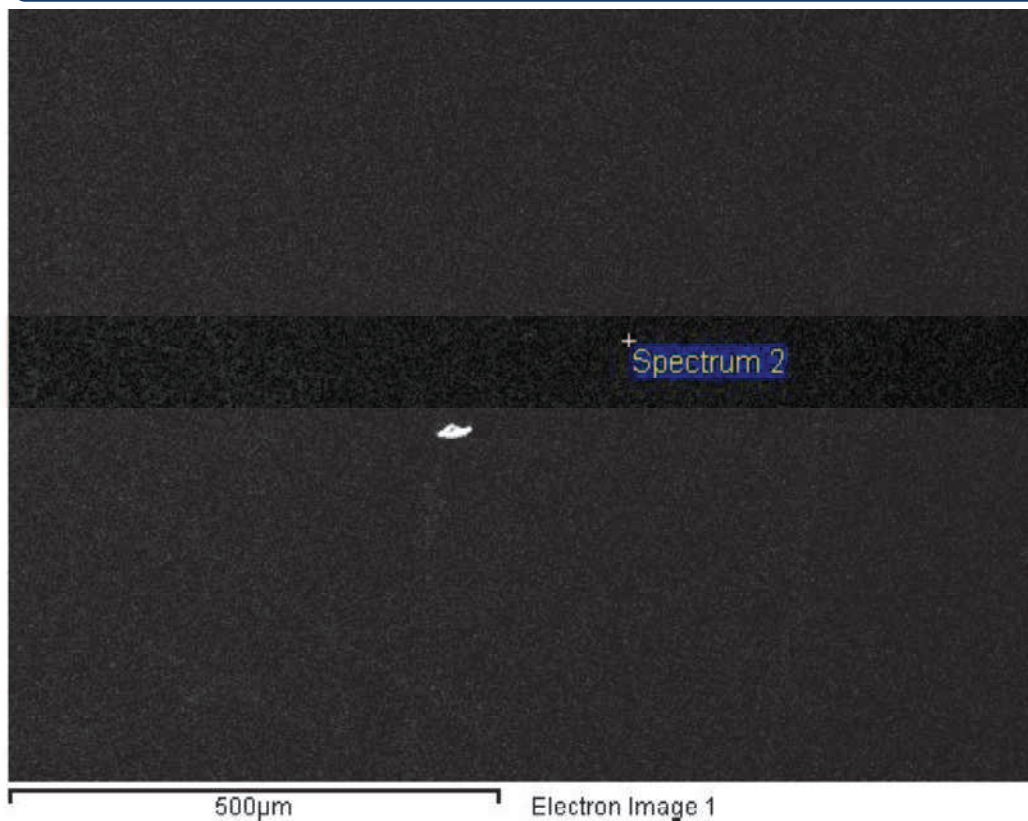


**Índice**

<b>A.I.1 Informe Metalográfico de Ti6Al4V.....</b>	<b>A.I.1</b>
--	--------------



## A.I.1 Informe Metalográfico de Ti6Al4V

Aleación con base de Titanio (*Ti6Al4V*)

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	Al	Ti	V	Total
Spectrum 1	Yes		5.47	94.53		100.00
Spectrum 2	Yes	1.89	6.02	88.00	4.09	100.00
Max.		1.89	6.02	94.53	4.09	
Min.		1.89	5.47	88.00	4.09	

All results in weight%





# ANEXO II

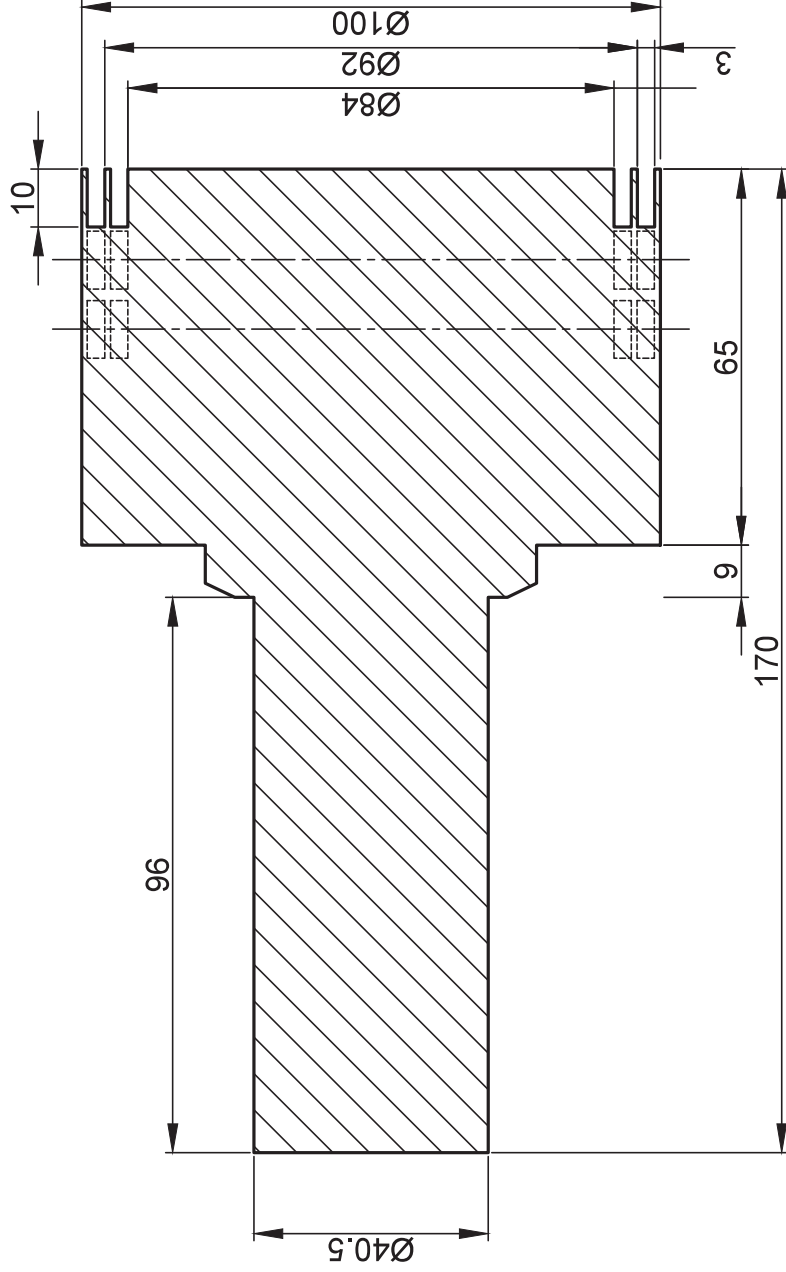
---

## DISEÑO DE PROBETA

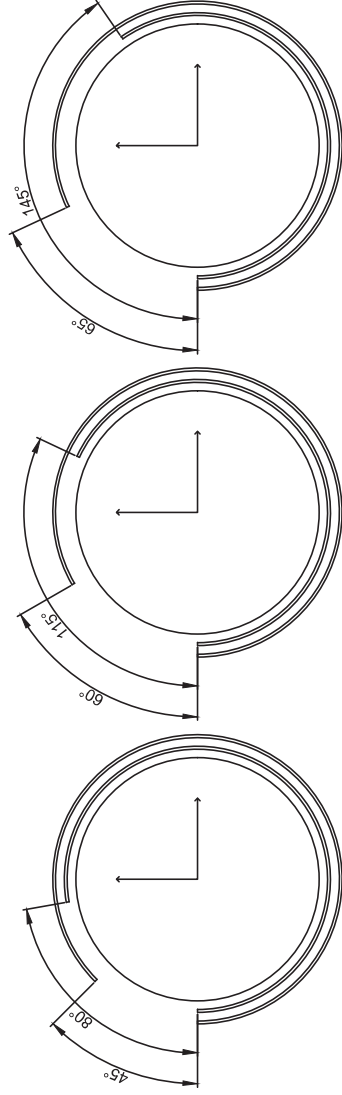
*Metodología para la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras de  
uso aeronáutico a través del análisis de la viruta*

---





Escala 1:1




Bloque 1

Bloque 2

Bloque 3

Escala 1:2

	Fecha	31.05.15	Fichero		
Dibujado	Yezika Sánchez Hernández		Diseño de probeta para corte ortogonal		
Material:	Ti6Al4V				
Tesis					
				Numero de Plano	
				1-1	
				Curso	
				2013-2016	

	<i>Metodología para la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras a través del análisis de la viruta</i>



# ANEXO III

---

## PROCEDIMIENTO PARA LA CAPTURA DE SEÑALES DE FUERZA DE CORTE

*Metodología para la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras de uso aeronáutico a través del análisis de la viruta*

---





**Índice**

<b>A.III.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>A.III.1</b>
<b>A.III.2</b>	<b>Procedimiento para el diseño de un proyecto .....</b>	<b>A.III.2</b>
<b>A.III.3</b>	<b>Verificación de señales eléctricas .....</b>	<b>A.III.6</b>
<b>A.III.4</b>	<b>Adaptación de equipos .....</b>	<b>A.III.7</b>
<b>Referencias</b>	<b>.....</b>	<b>A.III.8</b>



### A.III.1. Introducción

El propósito de este procedimiento es el establecimiento metódico de una serie de pasos que logren introducir de forma sencilla la elaboración de proyectos para la captura de señales eléctricas, de gran uso a nivel industrial, en el diagnósticos de maquinas rotativas, dinámica estructural, entre otras, a través del software PULSE LabShop®, de la marca comercial Brüel Kjær®.

Se siguen una serie de etapas que incluyen un conocimiento breve de cómo fue creado el sistema para adquirir datos, cómo diseñar un proyecto partiendo de una platilla base, la importancia para realizar ajustes para la captura de datos, seleccionar las funciones para el procesado de datos y, por último, la extracción de medidas.

Pulse LabShop® es una plataforma creada principalmente para el análisis en tiempo real y el post procesado de la grabación de señales de ruido y vibraciones. Combinado con un hardware diseñado de forma algorítmica, emplea conceptos comúnmente utilizados a nivel industrial como analizador de FFT (Transformada rápida de Fourier), CPB (Porcentaje constante del ancho de banda), análisis de orden, análisis espectral y SSR (Analizador de respuesta en estado estable).

Para este procedimiento se emplea el analizador FFT (Fast Fourier Transformation – Transformada Rápida de Fourier), que sigue un proceso similar a la Transformada Discreta de Fourier, pero con la utilización de un menor número de puntos, lo que se traduce en un menor tiempo de cálculo. Otro factor de gran importancia es la selección de filtro a utilizar. En ciertas ocasiones puede que exista una zona de frecuencias sin interés en la medida y que puede dificultar, e incluso llegar a impedir, realizar correctamente las mediciones, razón por la que se incluye en este documento.

Es importante indicar que para la elaboración de un proyecto se deben seguir los siguientes pasos, adaptados por el proveedor del software, ver Figura A.III.1.

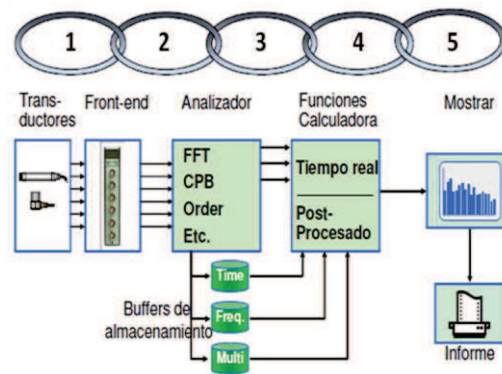


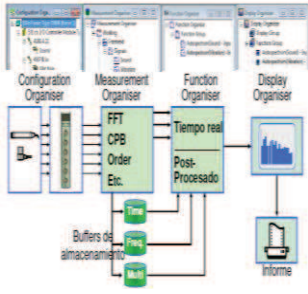
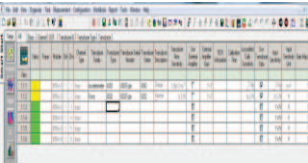
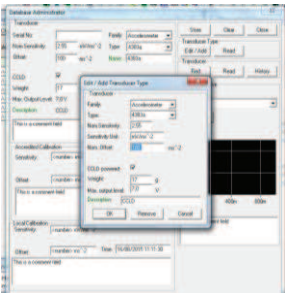
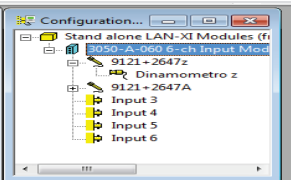
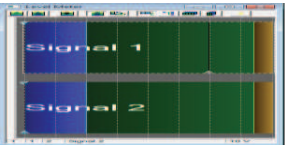
Figura A.III.1 Diagrama de fases para elaborar un proyecto por Brüel&Kjær®.



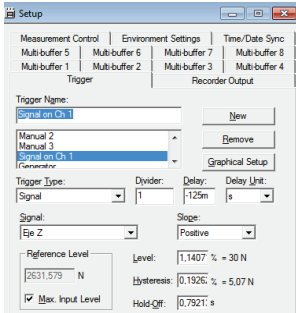
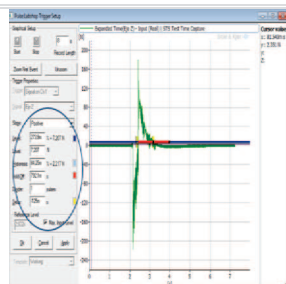
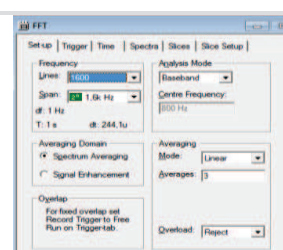
### A.III.2. Procedimiento para el diseño de un proyecto

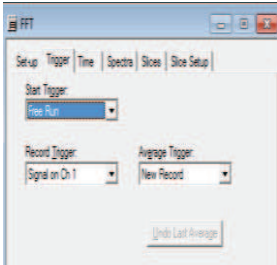
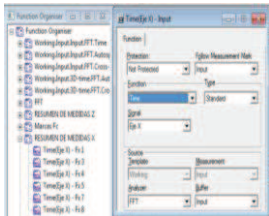
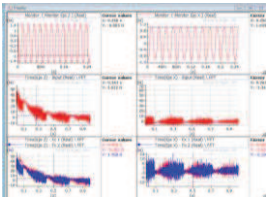
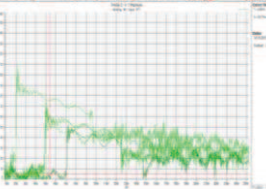


Se describe, a continuación, la serie de pasos recomendados para la adquisición de señales (fuerzas de corte), mostrados en Tabla A.III.1.

Tabla A.III.1 Procedimiento para el diseño de un proyecto.

Fase 1: Abrir programa			
Paso	Ayuda Visual	Actividad	Observaciones
1		<u>Conexión de equipos:</u> -LAN-XI 3050-A-60 -Ordenador de trabajo -Licencia del PULSE	Realizar las conexiones de arranque de los equipos básicos de uso.  Se comprueba que el modulo LAN se encuentra operativo, mediante el encendido de luz de color verde.
2		<u>Adaptar los transductores de señal al sitio de trabajo</u> -Acelerómetro -Martillo de impacto -Dinamómetro -Amplificador de carga	Realizar adaptaciones de entrada de equipos, si es necesario. En este caso, se realiza la comprobación de señales de forma independiente. -Acelerómetro & Martillo de impacto -Martillo de impacto & dinamómetro
3		<u>Abrir ó crear un programa en LabShop®</u>	Abrir PULSE > Labshop >visualiza las siguientes opciones: 1. Crear nuevo proyecto 2. Crear un proyecto en blanco 3. Crear nuevo proyecto con plantilla 4. Abrir proyecto existente
4		<u>Configuración del hardware</u>	Confirmar la correcta configuración del modulo LAN-XI, al proyecto de trabajo. Esta es la unidad que permite la comunicación entre el PC y el interface.

Continúa el procedimiento			
Fase 2: Configuración de proyecto (Configuration Organiser)			
Paso	Ayuda Visual	Actividad	Observaciones
1		<u>Organizar proyecto (analizador)</u>	Es recomendable describir un breve resumen de lo que espera hacer y el equipamiento a utilizar. Por ello, es importante tener en cuenta las 4 ventanas básicas.
		1. Configuration Organiser	Agregar la opción Configuración, la cual contiene detalles de entrada y salida de señal del Front end
		2. Measurement Organiser	Indicar la configuración de cada transductor que se va utilizar (características)
		3. Function Organiser	Configuración de funciones sobre las señales de salida
		4. Display Organiser	Configurar que medidas desean visualizar mediante gráficos
2		<u>Dar de alta los transductores al proyecto de trabajo</u>	Existen dos medios para dar de alta los transductores: -Configuration - Hardware Setup
3		<u>Database Administrator</u>	Ambos, despliegan el listado prediseñado por el proveedor; sin embargo, es posible dar de alta ó modificar las características técnicas.  <i>Nota:</i> Todo transductor con tecnología TEDS (Transducer Electronic Data Sheet) se activa de forma automática, de lo contrario se deberá de utilizar un Charge Amplifier - amplificador de carga.
4		<u>Database Administrator</u>	Una vez que el transductor esté conectado al software, requiere estar asignado al canal de captura.
5		Confirmar la recepción de señales en cada canal de trabajo	En este paso es importante actualizar todo cambio y, por ello, <b>F2 ó Activate template</b> . Esperar unos minutos hasta que el indicador de nivel estabilice la señal como indica la ayuda visual.

Continúa el procedimiento			
Fase 3: Configuración de medida (Measurement Organiser)			
Paso	Ayuda Visual	Actividad	Observaciones
1		<u>Measurement Organizer</u>	Se requiere crear grupos de señales para indicar qué función se desea analizar.  Frontend > Groups> New Group> Edit Label> Insert Signal.
2		<u>FFT Analyser</u>	Seleccionar el tipo de función donde analizara la frecuencia obtenida.  Insert Group> Group> Activate Template
3			<b>FFT Analyser&gt; Setup &gt; Properties &gt; Trigger</b>
Continúa el procedimiento			
Paso	Ayuda Visual	Actividad	Observaciones
4		<u>Configurar Trigger</u>	Esta opción condiciona la medida. Indica que momento debe ajustar la señal. Y puede ajustarse según sea el caso.  Dar de alta un nuevo Trigger: <b>Trigger 1&gt; New &gt; Trigger Type&gt; Signal&gt; Graphical Setup &gt; Start&gt; OK</b>
5		<u>Configurar Trigger</u>	Ajustar el nivel de respuesta: <ul style="list-style-type: none"><li>• Slope</li><li>• Level</li><li>• Hysteresis</li><li>• Hold-off</li><li>• Divider</li><li>• Delay de forma</li></ul> <i>Hysteresis indica la cantidad que el nivel de la señal debe cambiar por después de activarse.</i>
6		<u>Frequency</u>	<b>FFT Analyser&gt; Setup &gt; Frenquency</b>  Ajustar la resolución o líneas para el análisis de señal, mediante la amplitud de frecuencia y el tipo de promedio a utilizar, para este procedimiento se emplea un filtro de 1 Hz.

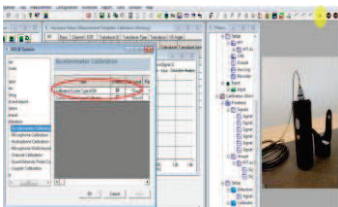
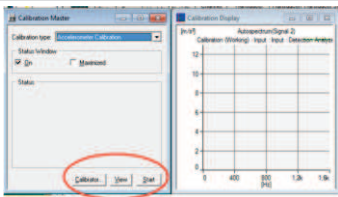
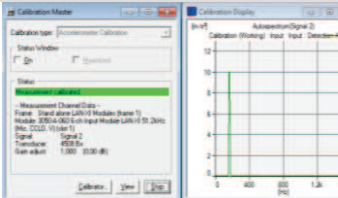
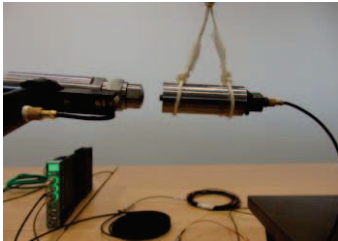


Fase 5: Configuración de funciones (Display Organiser)			
Continúa el procedimiento			
Paso	Ayuda Visual	Actividad	Observaciones
7		<u>Trigger</u> Start Trigger: Activación del analizador Record Trigger: Qué dispara la adquisición de señal Average Trigger cuando se realiza un promedio	<b>FFT Analyser » Setup » Trigger</b>  Configurar el inicio de donde se va a activar el Trigger.  <b>Start Trigger » Trigger 1 » Record Trigger » Trigger 1 » Activate Template</b>
Fase 4: Configuración de funciones (Function Organiser)			
1		<u>Functions property</u>	<b>Function Organiser » Function Group » Insert » Properties » Function</b>  Despliega un listado de funciones en las que fue diseñado el software y elegir las que más se ajuste al proyecto.
2			
1		<u>Measurement</u>	Start, indicar el inicio de la medida y se ajustará de acuerdo a las condiciones del trigger.
2		<u>Visualizar grafico</u>	<b>Time function » Show as » Classic or Modern Display</b> Una vez terminado la medida se despliega su valor mediante una grafica.
3		<u>Guardar medidas</u>	<b>File » Save</b> Guardar medidas y salvar proyecto.  Desde el Function Organiser: copiar datos y pegarlos en Excel de forma directa.
4		<u>Exportar proyecto</u>	Existe una opción para exportar las medidas obtenidas en cada ensayo ya en formato docx.



### A.III.3. Verificación de señales eléctricas

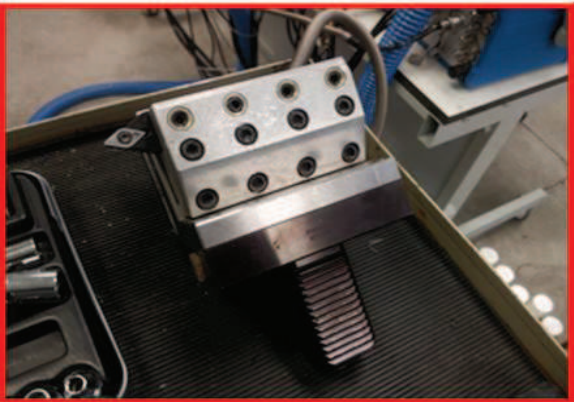

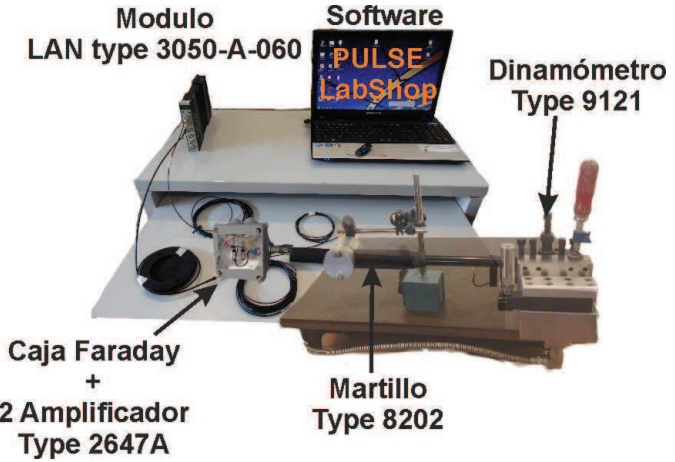
Una vez ajustadas las señales de trabajo, es recomendable verificar su rango de lectura mediante el procedimiento de calibración estática a través de un patrón de medida normalizado. Tabla A.III.2.

**Tabla A.III. 2.** Procedimiento para verificar señales.

Calibración de acelerómetro			
Paso	Ayuda Visual	Actividad	Observaciones
1		<u>Configuración de señales</u>  -Acelerómetro -Calibrador de vibraciones	En este caso, para confirmar la señal del acelerómetro, utilizando el módulo de calibración del LabShop®, indicado en la ayuda visual.  Posteriormente, se indica el patrón de medida.
2		<u>Calibración mediante LabShop®</u>	Antes de iniciar la calibración es necesario activar el patrón de medida y una vez iniciado su vibración indicar START, para adquirir datos del acelerómetro.
3		<u>Verificar señales</u>	El proceso de calibración termina indica mediante grafico el dato de captura del transductor, en este caso del acelerómetro.
Calibración de Martillo y dinamómetro (Estático)			
1		<u>Configuración de señales</u>  -Martillo de impacto -Amplificador de carga -Acelerómetro	Seguir los siguientes pasos: 1. Conectar equipos al módulo 2. Crear proyecto para validar señal 3. Tener una masa conocida 4. Realizar lectura y confirmar valores
2		<u>Configuración de señales</u>  -Dinamómetro -Amplificador de carga	Seguir los siguientes pasos: 1. Conectar equipos al módulo 2. Crear proyecto para validar señal 3. Realizar mediciones.  Este procedimiento también se aplica instalado al torno (calibración dinámica)
3		<u>Verificar lectura de ambos equipos</u>	Confirmar valores de ambos transductores

A.III.4. Adaptación de equipos

Tabla A.III.3 Actividades realizadas para la captura de señales.

Antes	Después
<p>Equipamiento Dinamómetro KISTLER</p> <p>Type 9121 + 9153A20 + 9155A30 + 1689B5</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Adaptador con entrada VDI</li><li>- Soporte de herramienta de 20x20</li></ul>  <ul style="list-style-type: none"><li>• Requiere realizar diseño para adaptarlo a la torreta</li><li>• Capacitación y/o ayuda técnica para el uso del equipo</li><li>• Accesorios necesarios para la captura de datos</li></ul>	 <p>Implementación para la captura de señales:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Se fabricó un soporte idóneo para adaptar el dinamómetro a la torreta del portaherramientas, considerando la altura del corte.</li><li>• Ajuste electrónico del conector al modulo de adquisición de datos y la adaptación de amplificadores de carga.</li><li>• Diseño de un ambiente libre de campo electromagnético mediante el uso de una caja faraday, que permite aislar posibles ruidos ajenos al proceso.</li><li>• Diseño de proyecto para la captura de señales mediante el software PULSE, basado en el criterio tipo SISO - Single Input Single Output.</li><li>• Creación de protocolo para la fabricación de proyecto</li><li>• Diseño para la verificación de señales adquiridas en ambos equipos</li><li>• Criterios para el análisis de datos capturados</li></ul> 

## Referencias

La plataforma Pulse LabShop® cuenta con una amplia librería, desarrollada por Brüel&Kjær®, en la que se incluyen conceptos referentes a sus módulos, aplicaciones y consejos para hacer uso del software. Esta librería recibe el nombre de Knowledge Library, en la cual se puede encontrar plantillas de trabajo que pueden ser adaptadas según las necesidades particulares del usuario. A su vez, cuentan con documentos en formato PDF, en los que se explican temas referentes al análisis de señales y, por último, casos prácticos aplicados a la vida real.

Sin embargo, para este procedimiento se identifican los archivos más representativos y básicos necesarios para diseñar un proyecto mediante el uso de plataforma Pulse LabShop®. Nota importante, esta información sólo puede ser visualizada con la ayuda del CD proporcionado por el proveedor.

<b>Código</b>	<b>Aplicación</b>
BR1505	Getting started with the PULSE interface- Guía Rápida para la creación de proyectos mediante LabShop®
BR0094	Measuring vibration – Guía rápida sobre cómo medir vibraciones
BO0436	Time Windows
BR1680	Hammer Demo Guide- Guía para el uso de martillo de impacto
BA779011	Save Export to disc- Guía rápida para salvar medidas
BA779111	Export_to Excel – Guía rápida de cómo exportar datos a Excel





# ANEXO IV

---

## EQUIPAMIENTO PARA LA ADQUISICION DE DATOS





**Índice**

<b>A.IV.1</b>	<b>Modulo LAN-XI.....</b>	<b>A.IV.1</b>
<b>A.IV.2</b>	<b>Acelerómetro .....</b>	<b>A.IV.9</b>
<b>A.IV.3</b>	<b>Martillo de Impacto .....</b>	<b>A.IV.17</b>
<b>A.IV.4</b>	<b>Amplificador de carga .....</b>	<b>A.IV.22</b>
<b>A.IV.5</b>	<b>Calibrador de vibraciones.....</b>	<b>A.IV.31</b>
<b>A.IV.6</b>	<b>Dinamómetro .....</b>	<b>A.IV.35</b>



### **A.IV.1 Modulo LAN-XI**

# PRODUCT DATA

## 4/6-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz — Type 3050

A stand-alone 4- or 6-channel system, a building block of a high-density 60+ channel system, or both, Type 3050 is available in four variants:

- Type 3050-A-060 6-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (Mic, CCLD, V)
- Type 3050-A-040 4-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (Mic, CCLD, V)
- Type 3050-B-060 6-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (CCLD, V)
- Type 3050-B-040 4-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (CCLD, V)

The same Type 3050 module can be combined with other LAN-XI modules across a network or in LAN-XI frames to create very compact high-channel systems. Applications include:

- Noise source identification using an acoustic array
- Operating deflection shape
- Modal analysis
- Other high-channel count measurements in sound and vibration

The individual modules have a very rugged industrial design that is perfect for use in the field and at the same time are plug and play modules that you can easily reconfigure in different setups for maximum flexibility and return on investment.



### Single Module as Front-end

#### Uses

- General sound and vibration measurements up to six channels
- Measurement front-end for PULSE measurement and analysis software
- Front-end for PC-based Data Recorder Type 7708
- Stand-alone recording (no PC) to memory card with LAN-XI Notar

#### Features

- 51.2 kHz bandwidth for noise and vibration measurements
- Dyn-X technology input channels, 160 dB input range
- 65.5 ksamples/s sampling rate
- Built-in Constant Current Line Drive (CCLD) conditioning to power accelerometers, microphones and tacho probes
- CCLD conditioning is compatible with DeltaTron, ICP® and IEPE instrumentation

- LAN interface allows the front-end to be close to the test object and reduces the number of signal cables and transducer cable length
- Clear indication of incorrect/defective conditioning on each channel connector
- Flexible power options when used as a single module: mains, DC, battery and PoE (IEEE 802.3af)
- Fanless for silent operation when used as a single module
- Automatic configuration with TEDS (IEEE 1451.4) transducers
- Robust casing for industrial and hard everyday use
- Extremely low noise floor
- Extremely long battery life, >7 hours, and ability to swap battery in the field for even longer measurement sessions
- Interchangeable front panels (BNC, LEMO or multi-pin connectors) – use your preferred cabling
- Display on each module's front panel:
  - Simplifies system configuration and reduces the time for setting up a measurement system
  - Provides module status information on self-test and error conditions

### **One Cable Operation**

You can use standard LAN cables for synchronous sampling between modules and system power, thanks to Power over Ethernet (PoE). This minimises the number of cables required and results in lower cost, less downtime, easier maintenance, and greater flexibility of installation.

### **Power over Ethernet**

PoE is implemented according to IEEE 802.3af. PoE is wired Ethernet LAN technology that, with a suitable PoE LAN switch, allows the power needed for each module to be carried by screened shielded twisted pair (S/STP or S/FTP) CAT6 LAN cables rather than by separate power cables. This minimises the number of cables required and results in lower cost, less downtime, easier maintenance and greater installation flexibility. PoE switches, such as the Cisco® SG300-10MP, 10-port 10/100/1000 Managed Gigabit Switch with Maximum PoE (8 ports), and PoE Injectors, such as ZyXEL PoE-12 Power over Ethernet (a single-port PoE injector), can be used.

### **Built for Field and Lab Use**

The modules and the detachable front plates are cast in magnesium for maximum stability, light weight, and tough field use.

### **Interchangeable Front Panels**

The modules allow front panels to be interchanged freely, with a variety of connectors for different transducers and applications. This results in fewer patch panels, less cable “spaghetti”, fewer cable adaptors and faster system setup.

### **Independent Channels**

The input channels on a module can be set up independently. You can set up the high-pass filters and input gain separately and attach different types of transducer to different channels.

### **IEEE 1451.4 Transducers**

Input modules support TEDS transducers. This allows automatic front-end and analyzer setup based on TEDS information stored in the transducer, for example, sensitivity, serial number, manufacturer and calibration date. The individual frequency response of a transducer can be corrected for using Transducer Response Equalisation, REq-X, to achieve higher accuracy over extended frequency ranges.

### **Overload**

Constant Current Line Drive (CCLD) conditioning monitors the supply voltage used by CCLD, DeltaTron, ICP® or IEPE compatible transducers. Available CCLD transducers include:

- Accelerometers
- Charge amplifiers
- Microphone preamplifiers
- Tacho probes

If conditioning errors, such as a broken cable, are detected, an error is indicated as an overload on the specific channel connector (using a ring-LED around the connector) and in the PC software.

Overload indications for input channels include (see Specifications for details):

- Signal overload with adjustable detection level
- CCLD overload: detection of cable break, short-circuit or CCLD transducer working point fault
- Common mode voltage overload – relevant when input coupling is floating

### **Ground-loop Noise Suppression**

The module’s floating/grounded, differential input design and the fact that all external connections (LAN, power supply) are galvanically isolated in the module provide optimal ground-loop noise suppression.

## Modules as Part of LAN-XI System

### Uses

- Real-time, multichannel sound and vibration data acquisition system: scalable from 2 to 1000+ measurement channels, all phase- and sampling-synchronous (IEEE 1588 Precision Time Protocol)
- Distributed multichannel system setups with multiple single-module front-ends located close to each measurement point
- Multichannel systems comprising any number of front-end frames in combination with any number of single-module front-ends
- Measurement front-end for PULSE measurement and analysis software
- Front-end for PC-based Data Recorder Type 7708

### Features

- Flexible power options when used in a frame: mains, DC and battery
- Highly accurate phase match using IEEE 1588 Precision Time Protocol
- Distributed system simplifies setup and reduces cost of cabling
- Two frames are available:
  - Type 3660-C houses up to 5 input/output/battery modules (up to 60 channels)
  - Type 3660-D houses up to 11 input/output/battery modules (up to 132 channels)
- Large system can be created from individual, distributed modules, LAN-XI frames and IDA<sup>e</sup> front-ends
- Silent operation (cooling fans turn on only when maximum safe temperature is exceeded)
- Phase- and sample-synchronous measurement with other LAN-XI modules and IDA<sup>e</sup> systems
- Plug and play modules can be removed for field measurements using a single module or swapped for calibration or repair
- Modules can be locked or screwed in place

### System Overview

LAN-XI Data Acquisition Hardware Type 3660 covers a range of input/output modules that can be used stand-alone, in a distributed network or in frames holding up to 11 modules. Fully compatible with PULSE IDA<sup>e</sup> hardware, LAN-XI hardware is extremely flexible and can be easily reconfigured as requirements demand into systems from 2 channels to more than 1000.

Table 1 gives an overview of available hardware and sources of further information on frames, modules, details of the input and output channels and specifications.

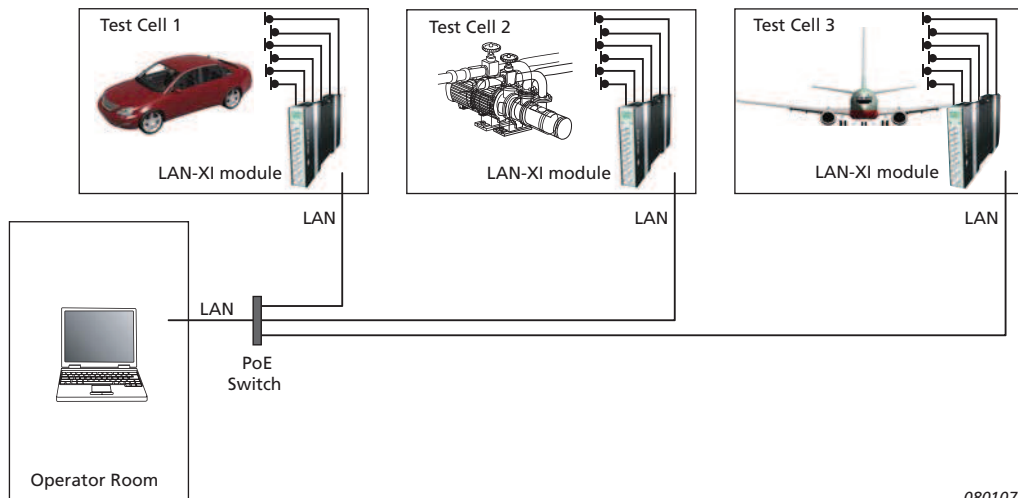
**Table 1**  
Overview of the components available for use in a LAN-XI system and in combination with PULSE IDA<sup>e</sup> hardware

Type No.*	Name	Further Information
3050-A-060	6-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (Mic, CCLD, V)	LAN-XI – The next generation of acquisition hardware
3050-A-040	4-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (Mic, CCLD, V)	
3050-B-060	6-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (CCLD, V)	
3050-B-040	4-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (CCLD, V)	
3052-A-030	3-ch. Input Module LAN-XI 102.4 kHz (Mic, CCLD, V)	LAN-XI – The next generation of acquisition hardware
3052-B-030	3-ch. Input Module LAN-XI 102.4 kHz (CCLD, V)	
3160-A-042	Generator, 4/2-ch. Input/Output Module LAN-XI 51.2 kHz (Mic, CCLD, V)	LAN-XI – The next generation of acquisition hardware
3160-A-022	Generator, 2/2-ch. Input/Output Module LAN-XI 51.2 kHz (Mic, CCLD, V)	
3160-B-042	Generator, 4/2-ch. Input/Output Module LAN-XI 51.2 kHz (CCLD, V)	
3160-B-022	Generator, 2/2-ch. Input/Output Module LAN-XI 51.2 kHz (CCLD, V)	
3053-B-120	12-ch. Input Module LAN-XI 25.6 kHz (CCLD, V)	
3660-C	5-module LAN-XI Front-end Frame	LAN-XI – Type 3660-C 5-module and 3660-D 11-module frames and Type 2831-A Battery Module
3660-D	11-module LAN-XI Front-end Frame	
2831-A	Battery Module for LAN-XI	
BZ-7848-A	LAN-XI Notar, stand-alone recorder for single module	LAN-XI Stand Alone Recorder – LAN-XI Notar™
IDA <sup>e</sup>	IDA <sup>e</sup> platform of data acquisition hardware	

\* -A- versions are multipurpose input/output modules capable of providing microphone polarization voltage.  
-B- versions are "DeltaTron Only" input/output modules.

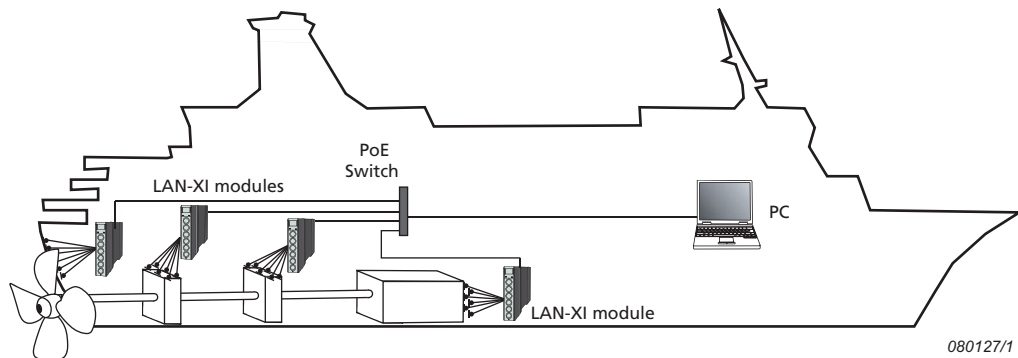
The ability to use any module as stand-alone, in a frame or in a distributed system means that you can place your modules close to the measurement object – the Precision Time Protocol (PTP) makes it possible to synchronise the clocks in the system components with sub-microsecond accuracy. With PoE, all you need between the modules and the PC are shielded CAT6 LAN cables and a PoE switch. This minimises the number of cables required and results in lower cost, less downtime, easier maintenance, greater flexibility and greater installation speed (see Fig. 1 and Fig. 2).

**Fig. 1**  
Using LAN-XI, cabling between test cells and operator room is drastically reduced to only a few LAN cables



080107

**Fig. 2**  
With a distributed system where modules are situated close to the measurement object, transducer cabling is also drastically reduced for measurements on large structures



080127/1

### One System, More Flexibility

Any module is a measurement system in itself and can be used in a rack, as stand alone or in a distributed system. As a result, fewer cables, fewer errors and faster setup.

### Silent Operation

Operation is silent in LAN-XI frame as long as the temperature of the unit is within safety limits. If the maximum safe operating temperature is reached, cooling fans activate. The SPL is <30 dB at 1 m.

### Power Supply

Types 3660-C and 3660-D both have integral transformers for connecting a 90 – 264 V AC, 47 – 63 Hz mains power supply or can be powered from a 10 – 32 V DC supply. In addition, each frame can house up to two Battery Modules Type 2831, which are capable of powering nine input/output modules for up to 40 minutes. Batteries can be hot-swapped to extend operation time. Frames cannot be powered by PoE.

### Sample Synchronisation Technique: Precision Time Protocol

For most sound and vibration applications, sample-synchronous and phase-matched measurements are a must. If no synchronisation method is used, two or more sampling systems will drift apart over time. Even the best clock systems available will, in less than 10 seconds, drift so far apart that the sample correlation will drop to an unacceptable level for high-quality sound and vibration measurements. Traditional measurement systems have a common sample clock ensuring synchronisation between measurement channels located in the same front-end frame. Newer systems have offered various cable-based synchronisation techniques between different front-ends – all with the significant disadvantage of requiring extra cabling.

With LAN-XI, Brüel & Kjær introduces a new technique to ensure sample-synchronous measurements over the same LAN connection used for transferring the measurement data. This simplifies the measurement system's cabling and makes it possible to perform sample-synchronous measurements over long distances,



eliminating the effect of delays over the cable and interconnected switches. PTP synchronisation provides a whole new set of possibilities for combining measurement systems located different places: closer to the actual measurement point, in different rooms/test cells, long distances between equipment. The only thing that is required is a LAN connection.

In practice:

- Less cabling is required so less time used for setting up a measurement system
- Less cable infrastructure is needed when defining and setting up new test cell facilities
- Much easier reconfiguration of existing test setups
- Highly accurate measurements are possible over long distances with only a LAN connection



#### *The IEEE 1588 Precision Time Protocol*

PTP synchronisation measures the delays between individual PTP components using a special algorithm (see the IEEE 1588 standard<sup>\*</sup>). By doing this, all delays can be accurately measured, and the individual clocks can be set to exactly the same time. On top of this, the phase drift of the “slave” clocks is continuously measured and counter-adjusted by a control loop, which adjusts the slave clocks’ speed. All Brüel & Kjær Sound & Vibration applications will work with either a high-performance 1 gigabit switch or a dedicated PTP switch<sup>†</sup>.

<sup>\*</sup> IEC 61588/IEEE 1588-2002, Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.

<sup>†</sup> Dedicated IEEE 1588 PTP switches are not commercially available at time of printing. Using a standard high-performance 1 gigabit switch, measurements will be sample- and time-synchronous.

## Compliance with Standards

 	CE-mark indicates compliance with EMC Directive and Low Voltage Directive C-Tick mark indicates compliance with the EMC requirements of Australia and New Zealand
<b>Safety</b>	EN/IEC 61010–1 and ANSI/UL 61010–1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use
<b>EMC Emission</b>	EN/IEC 61000–6–4: Generic emission standard for industrial environments CISPR 22: Radio disturbance characteristics of information technology equipment. Class B Limits FCC Rules, Part 15: Complies with the limits for a Class B digital device This ISM device complies with Canadian ICES–001 (interference causing equipment standard)
<b>EMC Immunity</b>	EN/IEC 61000–6–1: Generic standards – Immunity for residential, commercial and light industrial environments EN/IEC 61000–6–2: Generic standards – Immunity for industrial environments EN/IEC 61326: Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements <b>Note:</b> The above is only guaranteed using accessories listed in this Product Data
<b>Temperature</b>	IEC 60068–2–1 & IEC 60068–2–2: Environmental Testing. Cold and Dry Heat Ambient Operating Temperature: –10 to +55°C (14 to 131°F) Storage Temperature: –25 to +70°C (–13 to +158°F)
<b>Humidity</b>	IEC 60068–2–78: Damp Heat: 93% RH (non-condensing at 40°C (104°F))
<b>Mechanical</b>	Operating (peak values): MIL–STD – 810C: Vibration: 12.7 mm, 15 ms <sup>–2</sup> , 5 – 500 Hz Non-operating: IEC 60068–2–6: Vibration: 0.3 mm, 20 ms <sup>–2</sup> , 10 – 500 Hz IEC 60068–2–27: Shock: 1000 ms <sup>–2</sup> IEC 60068–2–29: Bump: 1000 bumps at: 250 ms <sup>–2</sup>
<b>Enclosure</b>	IEC 60529: Protection provided by enclosures: IP 31
<b>RoHS</b>	All LAN-XI products are RoHS compliant

### EFFECT OF RADIATED AND CONDUCTED RF, MAGNETIC FIELD AND VIBRATION

**Radiated RF:** 80–1000 MHz, 80% AM 1 kHz, 10 V/m

**Conducted RF:** 0.15–80 MHz, 80% AM 1 kHz, 10 V

**Magnetic Field:** 30 A/m, 50 Hz

**Vibration:** 5–500 Hz, 12.7 mm, 15 m/s<sup>2</sup>

Input measured with shorted input. All values are RMS. Conducted RF immunity on all channels is only guaranteed using an external connection from measuring ground to chassis terminal

Input	Radiated RF	Conducted RF	Magnetic Field	Vibration
Direct/CCLD	<250 µV	<300 µV	<4 µV	<80 µV
Preamplifier*	<250 µV	<50 µV	<8 µV	<80 µV

\* Types 3050-A-xxx

## Specifications – LAN Interface

### CONNECTOR

RJ 45 (10baseT/100baseTX) connector complying with IEEE –802.3 100baseX

Types 3660-C and -D permit the use of a ruggedized RJ45 data

connector (Neutrik NE8MC-1) to screw the cable to the frame

Types 3660-C and -D communicate at 1000 Mbits/s: shielded cables of type “CAT 5e” or better should be used

Individual modules communicate at 100 Mbits/s

All LAN connectors support MDIX, which means that cables may be “crossed” or not

For stand-alone modules, PoE is also supported (IEEE 802.3af). PoE requires screened shielded twisted pair (S/STP or S/FTP) CAT6 LAN cables

### PROTOCOL

The following standard protocols are used:

- TCP
- DHCP (incl. Auto-IP)
- DNS (on top of UDP)
- IEEE 1588–2002 (on top of UDP)
- IP
- Ethernet

### ACQUISITION PERFORMANCE

Each LAN-XI module generates data at almost 20 Mbit/s when measuring six channels at 51.2 kHz bandwidth. The modules are capable of handling their own maximum traffic while the built-in switch in the frame's backplane has more than sufficient capacity. This means that bottlenecks can only occur outside these, for example in:

- External switches
- PC

For convenience, it is possible to daisy-chain LAN-XI frames. However, it is not recommended to daisy-chain more than two frames. For larger configurations, a star configuration with a central switch is recommended. This must have a switch capacity well beyond  $N \times 20$  Mbit/s, where  $N$  is the total number of modules

### PTP PERFORMANCE

#### PTP Synchronisation (with 1 Gigabit LAN Switch):

Typical sample synchronisation better than 200 ns

(approx.  $\pm 0.07^\circ$  @ 1 kHz,  $\pm 2^\circ$  @ 25.6 kHz)

Tested with:

- Cisco® SG300-10MP, 10-port 10/100/1000 Managed Gigabit Switch with Maximum PoE (8 ports)
- Netgear® 5-port Gigabit Switch GS105

Better performance can be expected with a dedicated PTP switch

## Specifications – 4/6-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz Type 3050

### POWER REQUIREMENTS

**DC Input:** 10–32 V DC

**Connector:** LEMO coax., FFA.00.113, ground on shield

**Power Consumption:**

**DC Input:** <15 W

**Supply via PoE:** According to IEEE 802.3af, Max. cable length 50 m

**Temperature Protection:**

Temperature sensor limits module's internal temperature to 80°C (176°F).

If temperature exceeds limit, system will automatically enable fan in

LAN-XI frame or shut down module outside frame

### LAN

Connector type RJ45

### DIMENSIONS AND WEIGHT

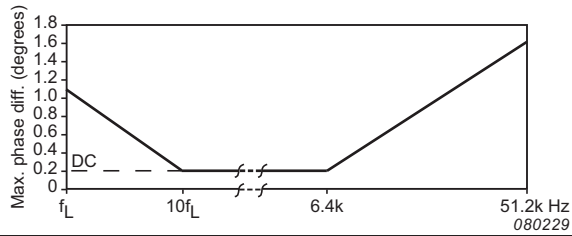
**Height:** 132.6 mm (5.22")

**Width:** 27.5 mm (1.08")

**Depth:** 250 mm (9.84")

**Weight:** 750 g (1.65 lb.)

<b>Frequency Range</b>		DC to 51.2 kHz Lower frequency range can be set in PULSE software			
<b>A/D Conversion</b>		2 × 24 bit			
<b>Data Transfer</b>		24 bit			
<b>Input Voltage Range</b>		10 V <sub>peak</sub> Extended range: 31.6 V <sub>peak</sub>			
<b>Input Signal Coupling</b>	<b>Differential</b>	Signal ground is “floating” (1 MΩ re: chassis)			
	<b>Single-Ended</b>	Signal ground is connected to chassis (“Grounded”)			
<b>Input Impedance</b>		Direct, Microphone: 1 MΩ    <300 pF CCLD: >100 kΩ    <300 pF			
<b>Absolute Maximum Input</b>		±60 V <sub>peak</sub> without damage			
<b>High-pass Filters</b>		<b>– 0.1 dB *</b>	<b>–10% @ **</b>	<b>–3 dB @ **</b>	<b>Slope</b>
* Defined as the lower frequency, $f_L$ , for guaranteed fulfilment of –0.1 dB accuracy in 10 V <sub>peak</sub> range	0.1 Hz –10% analog high-pass filter	0.5 Hz	0.1 Hz	0.05 Hz	–20 dB/dec.
	0.7 Hz –0.1 dB digital high-pass filter	0.7 Hz	0.15 Hz	0.073 Hz	
	1 Hz –10% digital high-pass filter	5 Hz	1.0 Hz	0.5 Hz	–20 dB/dec.
** Defined as the nominal –10%/3 dB filter frequency	7 Hz –0.1 dB digital high-pass filter	7 Hz	1.45 Hz	0.707 Hz	
	22.4 Hz –0.1 dB analog high-pass filter	22.4 Hz	15.8 Hz	12.5 Hz	–60 dB/dec.
	Intensity filter (analog)	115 Hz	23.00 Hz	11.5 Hz	–20 dB/dec.
<b>Absolute Amplitude Precision, 1 kHz, 1 V<sub>input</sub></b>		±0.05 dB, typ. ±0.01 dB			
<b>Amplitude Linearity</b> (linearity in one range)	0 to 80 dB below full scale	±0.05 dB, typ. ±0.01 dB			
	80 to 100 dB below full scale	±0.2 dB, typ. ±0.02 dB			
	100 to 120 dB below full scale	typ. ±0.02 dB			
	120 to 140 dB below full scale	typ. ±0.02 dB			
	140 to 160 dB below full scale	typ. ±1 dB			

<b>Overall Frequency Response</b> re 1 kHz, from lower limit $f_L$ to upper limit $f_U$ $f_L$ is defined as the lower frequency for guaranteed fulfilment of $-0.1$ dB accuracy in $10 V_{peak}$ range (see under High-pass Filters) $f_U$ is defined as the chosen frequency span. DC ( $f_L = 0$ )			$\pm 0.1$ dB  $\pm 0.3$ dB in 31.6 V range			
<b>Noise</b>  * Measured lin. 10 Hz to 25.6 kHz or lin. 10 Hz to 51.2 kHz:  (Input terminated by $50 \Omega$ or less)		<b>Input Range</b>	<b>Guaranteed</b>		<b>Typical</b>	
			<b>Lin*</b>	<b>1 kHz</b>	<b>Lin*</b>	<b>1 kHz</b>
	<b>Signal level <math>&lt; 316 \text{ mV}_{peak}</math></b> 10 Hz to 25.6 kHz 10 Hz to 51.2 kHz	$10 V_{peak}$	$< 4 \mu V_{rms}$ $< 13 \mu V_{rms}$	$< 25 \text{ nV}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$	$< 3 \mu V_{rms}$ $< 10 \mu V_{rms}$	$< 19 \text{ nV}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$
	<b>Signal level <math>&gt; 316 \text{ mV}_{peak}</math></b> 10 Hz to 25.6 kHz 10 Hz to 51.2 kHz	$10 V_{peak}$	$< 60 \mu V_{rms}$ $< 350 \mu V_{rms}$	$< 375 \text{ nV}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$	$< 50 \mu V_{rms}$ $< 250 \mu V_{rms}$	$< 313 \text{ nV}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$
	<b>Signal level <math>&lt; 1 V_{peak}</math></b> 10 Hz to 25.6 kHz 10 Hz to 51.2 kHz	$31.6 V_{peak}$	$< 20 \mu V_{rms}$ $< 45 \mu V_{rms}$	$< 125 \text{ nV}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$	$< 15 \mu V_{rms}$ $< 35 \mu V_{rms}$	$< 95 \text{ nV}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$
	<b>Signal level <math>&gt; 1 V_{peak}</math></b> 10 Hz to 25.6 kHz 10 Hz to 51.2 kHz	$31.6 V_{peak}$	$< 200 \mu V_{rms}$ $< 1200 \mu V_{rms}$	$< 1250 \text{ nV}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$	$< 150 \mu V_{rms}$ $< 800 \mu V_{rms}$	$< 950 \text{ nV}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$
<b>Spurious-free Dynamic Range re Full-scale Input</b> (Input terminated by $50 \Omega$ or less) Spurious-free Dynamic Range is defined as the ratio of the rms full-scale amplitude to the rms value of the largest spurious spectral component (non-harmonic)		<b>Input Range</b>	<b>Typical</b>			
		$10 V_{peak}$	160 dB			
		$31.6 V_{peak}$	140 dB			
<b>DC Offset re Full Scale</b> Measured after automatic DC compensation at current temperature when changing from AC to DC coupling or changing input range when DC coupled			<b>Guaranteed</b>		<b>Typical</b>	
			$< -90$ dB		$-100$ dB	
<b>Harmonic Distortion</b> (all harmonics)			<b>Guaranteed</b>		<b>Typical</b>	
			$-80$ dB ( $-60$ dB in 31.6 V range)		$-100$ dB @ 1 kHz ( $-80$ dB @ 1 kHz in 31.6 V range)	
<b>Crosstalk:</b> Between any two channels of a module or between any two channels in different modules			<b>Frequency Range</b>		<b>Guaranteed</b>	<b>Typical</b>
			0–51.2 kHz		$-100$ dB	$-140$ dB
<b>Channel-to-Channel Match</b>			<b>Guaranteed</b>		<b>Typical</b>	
<b>(<math>10 V_{peak}</math> input range)</b>	Maximum Gain Difference $f_L$ is defined as the $-0.1$ dB frequency of the high-pass filter		0.2 dB from lower frequency limit, $f_L$ , to 51.2 kHz (0.4 dB at $-10\%$ filter frequency)		$\pm 0.05$ dB	
	Maximum Phase Difference (within one frame) $f_L$ is defined as the $-0.1$ dB frequency of the high-pass filter					
	Additional PTP sync. error (phase difference) between modules/frames (using a single standard gigabit switch)		<b>Typical:</b> $< 200$ ns (approx. $\pm 0.07^\circ$ @ 1 kHz, $\pm 2^\circ$ @ 25.6 kHz)			
<b>Channel-to-Channel Match</b> ( $31.6 V_{peak}$ input range)		Maximum Gain Difference	0.6 dB from lower frequency limit, $f_L$ , to 51.2 kHz (1 dB at $-10\%$ filter frequency)			
		Maximum Phase Difference (within one frame)	$4^\circ$ from lower frequency limit, $f_L$ , to 51.2 kHz			
<b>Sound Intensity Phase Match</b> (only for using intensity filter and in $10 V_{peak}$ input range)	<b>Frequency Range</b>	<b>Guaranteed Phase Match</b>		<b>Typical Phase Match</b>		
	50–250 Hz	$\pm 0.017^\circ$		$\pm 0.005^\circ$		
	250 Hz–2.5 kHz	$0.017^\circ \times (f/250)$		$\pm 0.005^\circ$		
All channels matched	2.5–6.4 kHz	$\pm 0.17^\circ$		$\pm 0.08^\circ$		
<b>Common Mode Rejection in <math>10 V_{peak}</math> input range</b>			<b>Guaranteed</b>		<b>Typical</b>	
Values for $31.6 V_{peak}$ range are 10 dB lower.	0–120 Hz	70 dB		80 dB		
	120 Hz–1 kHz	55 dB		60 dB		
	1–51.2 kHz	30 dB		40 dB		
<b>Absolute Max. Common Mode Voltage</b>			$\pm 5 V_{peak}$ without damage			
			$\pm 4 V_{peak}$ without clipping)			
			If common mode voltage exceeds the max. value, care must be taken to limit the signal ground current in order to prevent damage. Max. is 100 mA. The instrument will limit the voltage to the stated max. "without damage" common mode value			

<b>Anti-aliasing Filter</b> At least 90 dB attenuation of those frequencies which can cause aliasing	Filter Type	3rd order Butterworth
	–0.1 dB @	51.2 kHz
	–3 dB @	128 kHz
	Slope	–18 dB/octave
<b>Supply for Microphone Preamplifiers</b>	(Types 3050-A-xxx only)	±14.0 V, max. 100 mA per channel (max. 100 mA total/module)
<b>Supply for Microphone Polarization</b>	(Types 3050-A-xxx only)	200 V ±1 V, or 0 V (Set per channel)
<b>Supply for DeltaTron/ICP®/CCLD</b>		4 to 5 mA from 24 V source, option to DC-couple CCLD power supply
<b>Tacho Supply</b>		CCLD for MM-0360 (Power supply for legacy Types MM-0012 and MM-0024 not available)
<b>Analog Special Functions</b>	<b>Microphone Charge Injection Calibration:</b> All modules with 7-pin LEMO support CIC via dedicated application software and OLE interface <b>Transducers:</b> Supports IEEE 1451.4-capable transducers with standardised TEDS (up to 100 m cable length)	
<b>Overload Detection</b>	<b>Signal Overload:</b> Adjustable detection level $\pm 1 V_{peak}$ to $\pm 10 V_{peak}$ . Default level $\pm 10 V_{peak}$ (CCLD mode $\pm 7 V_{peak}$ ) (31.6 V range: $\pm 31.6 V$ ) can be set in PULSE Transducer Database <b>CCLD Overload:</b> Detection of cable break or short-circuit + detection of CCLD transducer working point fault. Detection level: +2 V/20 V <b>Microphone Preamplifier Overload:</b> Detection of microphone preamplifier current consumption too high or too low. Detection level default 10 mA/1 mA Adjustable detection level 1 to 20 mA or 100 mA if disabled <b>Common Mode Voltage Overload:</b> Detection level: $\pm 3.0 V$	
<b>Protection</b>	If signal input level exceeds the measuring range significantly, the input will go into protection mode until the signal goes below the detection level again for at least 0.5 s. While in protection mode, the input is partly switched off and the input impedance is greatly increased. (The measured value will be strongly attenuated but still detectable) In DC mode $-10 V_{peak}$ range, the detection limit is $\pm 12 V$ . In all other measuring modes (except CCLD) the limit is $\pm 50 V_{peak}$ including DC component or $\pm 12 V_{peak}$ AC (In CCLD mode the limit is $+50/-2 V_{peak}$ including DC component or $\pm 12 V_{peak}$ AC) In the 31.6 V range, the limit is $\pm 50 V_{peak}$	

## Ordering Information

Type No.*	Name	Accessories Included
3050-A-060	6-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (Mic, CCLD, V)	UA-2100-060 Detachable front panel with 6 BNC input connectors
3050-A-040	4-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (Mic, CCLD, V)	UA-2100-040 Detachable front panel with 4 BNC input connectors
3050-B-060	6-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (CCLD, V)	UA-2100-060 Detachable front panel with 6 BNC input connectors
3050-B-040	4-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz (CCLD, V)	UA-2100-040 Detachable front panel with 4 BNC input connectors

\* -A- versions are multipurpose input/output modules capable of providing microphone polarization voltage. -B- versions are "DeltaTron Only" input/output modules

### OPTIONAL ACCESSORIES

AO-0090	7-pin LEMO to BNC male (1.2 m) for floating ground
AO-0091	7-pin LEMO to BNC female (1.2 m) for floating ground
AO-0526	4-pin Microtech to 3 × BNC Cable
AO-0546	DC Power Cable, Car Utility Socket to 1 module
AO-0548	DC Power Cable, Source to 4 modules
AO-1450	Shielded CAT 6 LAN Cable with RJ45 (2 m)
JJ-0081	BNC Adaptor, female to female
JJ-0152	BNC T-connector
JP-0145	BNC to 10–32 UNF Plug Adaptor
UA-1713	10 × 2 mm Allen Key (QX-1315) for front panel exchange
UL-0252	Cisco SG300-10MP, 110-Port 10/100/1000 Managed Gigabit Switch with Maximum PoE (8 ports)
WB-1497	20 dB Attenuator

### SOFTWARE

Please refer to the System Data for PULSE Software (BU 0229)

### Service Products

3050-CAI	3050 Initial Accredited Calibration
3050-CAF	3050 Accredited Calibration
3050-CTF	3050 Traceable Calibration
3050-TCF	3050 LAN-XI Conformance Test with Certificate

A wide range of Brüel & Kjær Accelerometers, Microphones, Preamplifiers and Sound Intensity Probes is available for use with a LAN-XI system. The system supports IEEE 1451.4-capable transducers with standardised TEDS

### TRADEMARKS

ICP is a registered trademark of PCB Group Inc. · Netgear is a registered trademark of NetGear, Inc. · Cisco is a registered trademark of Cisco Systems, Inc. and/or its affiliates in the United States and certain other countries

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice. © Brüel & Kjær. All rights reserved.

HEADQUARTERS: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S · DK-2850 Nærum · Denmark  
Telephone: +45 7741 2000 · Fax: +45 4580 1405 · www.bksv.com · info@bksv.com

Local representatives and service organisations worldwide

**Brüel & Kjær** 



## **A.IV.2 Acelerómetro**

# PRODUCT DATA

## CCLD Accelerometer Types 4507 and 4508

## CCLD TEDS Accelerometer Types 4507-B and 4508-B

## Charge Accelerometer Types 4507-C and 4508-C

*CCLD<sup>\*</sup> Accelerometer Types 4507 and 4508 consist of a ThetaShear<sup>®</sup> accelerometer and a CCLD preamplifier in a lightweight titanium housing with integrated 10–32 UNF connectors. TEDS<sup>†</sup> version is also available. Types 4507-C and 4508-C are the charge types similar to the CCLD accelerometers but come without the preamplifier.*



### Uses and Features

#### Uses

- Structural analysis measurements
- Multichannel modal analysis measurements
- General purpose

#### Features

- Robust titanium housing with integrated hermetic titanium connector
- Easy fit to different test objects using a selection of mounting clips
- Lower sensitivity to RF (Radio Frequency) electromagnetic fields
- Low-weight ThetaShear design gives high sensitivity-to-weight ratio and very low sensitivity to environmental factors
- Triaxial mounting facility
- Excellent low-frequency response
- Low magnetic sensitivity

#### CCLD Accelerometers

- Connect directly to CCLD power supply
- CCLD principle allows the use of inexpensive cables
- Output impedance allows the use of long cables
- Built-in, low-noise preamplifiers with ASICs give more than 100 dB dynamic range
- Choice of sensitivities from 10 mV/g to 1 V/g
- Hermetic connector

#### Charge Accelerometers (Types 4507-C and 4508-C)

- Sensitivity of 5 pC/g
- Operating temperature up to 250°C (482°F)

\* CCLD: Constant Current Line Drive, also known as DeltaTron<sup>®</sup> (ICP<sup>®</sup> and IEPE compatible)

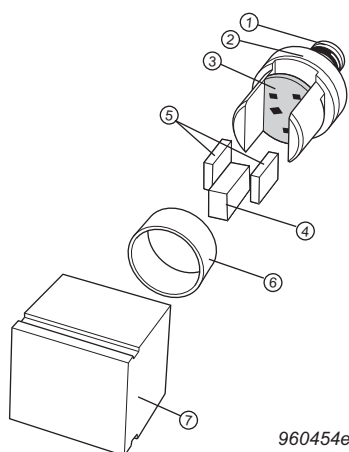
† TEDS: Transducer Electronic Data Sheet

## Description

Accelerometer Types 4507 and 4508 are specifically designed to withstand rough environments. A combination of high sensitivity, low mass and small physical dimensions makes them ideal for modal measurements such as automotive body and power-train ones as well as for modal analysis on aircraft, trains and satellites. The main difference between the Types 4507 and 4508 is the position of the coaxial connector, which is on the top surface perpendicular to the main axis for Type 4508 (top-mounted connector) and on the side surface parallel to the main axis for Type 4507 (side-mounted connector).

## Design

**Fig. 1**  
*Exploded view of  
Miniature CCLD  
Accelerometer  
Type 4508  
(top mounted  
connector) showing  
the ThetaShear  
design and built-in  
CCLD preamplifier*



The 10–32 UNF connector (1) is an integrated part of the top piece (2), which also contains the preamplifier (3) (not Type 4507-C or 4508-C). The slotted cylindrical stanchion holds a central seismic mass (4) flanked by two piezoelectric plates (5). This assembly is clamped rigidly by a ring (6). The parts are firmly held together without the use of any bonding agent other than friction, a principle which has proved extremely reliable in Brüel & Kjær DeltaShear® accelerometers. This assembly is hermetically welded to the titanium housing (7).

## Mounting

Special effort has been put into making the mounting process as flexible as possible. The accelerometer housing has slots that allow the use of mounting clips so that the accelerometers can be easily fitted to a number of different test objects, or removed, for calibration. UA-1407, UA-1475 and UA-1478 are sets which each contain 100 plastic mounting clips. UA-1564 is a set of 5 high-temperature mounting clips.

**Fig. 2**  
*High-temperature  
Mounting Clip UA-1564*



### Specifications:

Temperature range:	–55° to +175°C (–67° to +347°F)
Acceptable if discolouring:	up to +250°C (+482°F)
Weight:	5.7 grams (0.20 oz)
Maximum acceleration:	
(with 5 gram accelerometer):	50 g peak
(Perpendicular to mounting surface):	250 g peak
Material:	Base – Anodized aluminium; Spring – Stainless steel
Mounting:	10–32 UNF



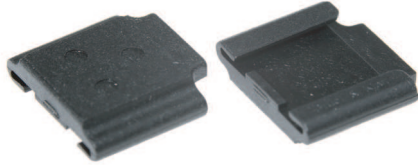
## Common Specifications for all Plastic Mounting Clips

**Temperature range:** –54°C to +50°C (–65° to +122°F)  
For brief use (<1 hour): up to +80°C (up to +176°F)

**Maximum acceleration:** 10g peak  
Perpendicular to mounting surface: 70g peak

**Material:** Glass reinforced polycarbonate

**Fig. 3**  
Mounting Clip  
UA-1407



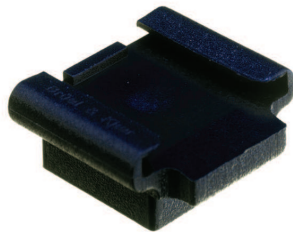
120593

**Fig. 4**  
Mounting Clip UA-1407 in use  
with Type 4508



<b>Specifications:</b>	Weight:	0.4 gram (0.014 oz)
	Upper limiting frequency, 10%:	
	– Type 4507 mounted with grease:	3 kHz
	– Type 4507 dry mounting:	1.5 kHz
	– Type 4508 mounted with grease:	4 kHz
	– Type 4508 dry mounting:	2 kHz

**Fig. 5**  
Mounting Clip with  
Thick Base UA-1408



990013/2

**Fig. 6**  
Mounting Clip with Thick Base  
UA-1475 can be filed down to suit  
the needs of your mounting  
surface. Here it is mounted on a  
tube with Type 4508



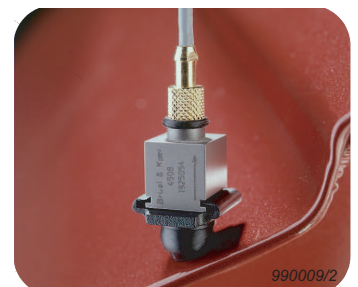
<b>Specifications:</b>	Weight:	0.7 gram (0.02 oz)
	Upper limiting frequency, 10%:	
	– Type 4507 mounted with grease:	3 kHz
	– Type 4507 dry mounting:	1.5 kHz
	– Type 4508 mounted with grease:	4 kHz
	– Type 4508 dry mounting:	2 kHz

**Fig. 7**  
Swivel Base UA-1478



120594

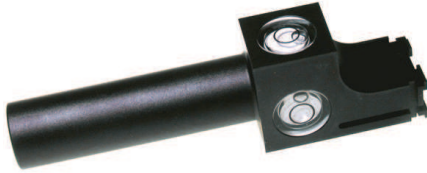
**Fig. 8**  
Swivel Base UA-1478 mounted  
on a sloping surface with  
Type 4508



**Specifications:**

Weight:	0.8 gram (0.028 oz)
Upper limiting frequency, 10% (mounted with grease):	
– Excited along accelerometer's axis of sensitivity and with mounting surface of hemispherical part perpendicular to excitation direction:	2.3 kHz
– Excited along accelerometer's axis of sensitivity and with mounting surface of hemispherical part at 45° to excitation direction:	1.7 kHz

**Fig. 9**  
Spirit Level  
UA-1480



990010/2

**Fig. 10**  
Spirit Level UA-1480 in use on  
Swivel Base UA-1478



990011/1

**Specifications:**

Max. dimensions:	85 × 23 × 17 mm (3.3 × 0.9 × 0.7 in.)
Material:	Black anodized aluminium

## Environmental Sensitivity

Some of the most troublesome environmental factors encountered when using piezoelectric accelerometers are temperature transients. By careful choice of materials, mechanical design and the shear concept, however, the influence of these factors has been reduced to a minimum. Special effort has also been made to minimise interference from RF (Radio Frequency) electromagnetic fields.

High humidity is another environmental factor that can influence the accuracy of piezoelectric transducers. Careful design and manufacturing have reduced this effect to a minimum for the Type 4507 and 4508 families. Furthermore, all CCLD members of the families (see Specifications) are equipped with hermetically sealed (glass) connectors, that make them completely independent of humidity and aggressive gases.

## Calibration

**Fig. 11**  
Calibration Clip  
DV-0459



120709

Each accelerometer is individually calibrated and supplied with a comprehensive calibration chart. Long-term stability and reliability are ensured by artificial ageing during the production process.

Field checking and system calibration are straightforward using Brüel & Kjær's Hand-held Vibration Calibrator Type 4294.

For calibration of Types 4507/4508, Calibration Clip DV-0459 is available (Fig. 11).

**Specifications**

Material:	
– Base:	Stainless steel (hardened)
– Spring:	Stainless steel spring
Mounting surface diameter:	21 mm
Mounting thread:	10–32 UNF
Weight:	17 grams

## CCLD Accelerometers

CCLD is a generic name identifying accelerometers and signal-conditioning products that operate on a constant-current power supply and give output signals in the form of voltage modulation on the power supply line. One of the advantages of this system is that it allows you to use inexpensive cables.

Accelerometers Types 4507 and 4508 can be used with all vibration setups with CCLD input modules.

The built-in, low-noise preamplifiers are made using thick film technology. They comprise ASICs including a special reference voltage that ensures very stable bias voltage over the entire operating temperature range.

The low-output impedance allows long cables connection of between the accelerometer and measurement equipment.

---

## Charge Accelerometers

---

Accelerometer Types 4507-C and 4508-C can be used in high-temperature applications up to 250°C (482°F), and the use of an external conditioning amplifier allows variable amplification for optimum signal-to-noise ratio. Brüel & Kjær has a wide range of equipment to support piezoelectric charge accelerometers, and Types 4507 and 4508 can be connected to the following:

- LAN-XI Front Panel UA-2105-060 – usable with Type 2647
- Charge to CCLD Converter Type 2647 (with TEDS) – which enables the accelerometers to be used with CCLD power supplies
- NEXUS™ Charge Conditioning Amplifier Type 2692 – suitable for conditioning the signal
- Measuring Amplifier Type 2525 – suitable for conditioning the signal
- Charge Amplifier Type 2635 – suitable for conditioning the signal

---

## Cables and Connectors

---

In order to distinguish the individual accelerometers in a multichannel measurement setup, coloured cable markers (UA-1243) are available to fit cables which are 1.6 mm and 2 mm in diameter.

Types 4507 and 4508 require cables with 10 – 32 UNF connectors. For general, non-critical use, standard cables AO-0463 and AO-0531 are recommended (not for Type 4507-C or 4508-C) since they are very flexible and economic.

For Types 4507-C and 4508-C, low-noise or super low-noise cables AO-0038, AO-0122, AO-0406 or AO-1382 are recommended (see Ordering Information for details).

### Maximum Cable Length (CCLD only)

The maximum output voltage of a CCLD accelerometer when driving long cables depends on the supply current at which it is operating and on the capacitive load due to the connecting cable.

The maximum cable length in metres (for distortion  $\leq 1\%$ ) is given by:

$$L = 140\,000 \times \frac{I_s - 1}{f \times V_o \times C_m}$$

where:

$I_s$  = supply current (mA)

$f$  = frequency (kHz)

$V_o$  = output voltage ( $V_{peak}$ )

$C_m$  = cable capacitance (pF/m)

---

## Characteristics

---

### Frequency Response

The following frequency response information is included on each accelerometer's accompanying calibration chart. However, certain accelerometers have this information built in electronically (TEDS) as well.

The upper frequency limits given in the specifications are the frequencies where the deviation from the reference sensitivity is less than 10%. It is approximately 30% of the mounted resonance frequency. This makes the assumption that the accelerometer is correctly mounted on the test structure – a poor mounting can have a marked effect on the mounted resonance frequency.

The lower frequency limits and phase response are determined by the built-in preamplifiers. The lower frequency limits are given in the specifications for deviations from reference sensitivity of less than 10%.

Increased measurement accuracy can be achieved by dividing the actual measurement by the individual frequency response.

Frequency response curves generated from the individual TEDS values are given on the calibration chart for the major part of the frequency range. At low frequencies, the curves given are typical.

The calibration chart also includes the individual TEDS values that, together with a general formula, best fit the measured frequency response. The expression can be used for frequency response compensation in the specified frequency range.

The relative frequency response, including amplitude and phase, is given by:

$$S_{rel}(f, T) = (\text{Sign}) \times (1 + b(T - T_{ref})) \times \frac{j \frac{f}{f_{hp}}}{\left(1 + j \frac{f}{f_{hp}}\right)} \times \frac{1}{\left(1 + j \frac{f}{f_{lp}}\right)} \times \frac{1}{\left(1 + \left(j \frac{f}{f_{res}}\right)^2 + j \frac{f}{Q f_{res}}\right)} \times \left(j \frac{f}{f_{ref}}\right)^{\frac{a}{\ln 10}}$$

where:

Sign	= Polarity	b	= Temperature Coefficient
T	= Temperature	T <sub>ref</sub>	= Reference Temperature
f	= Frequency	f <sub>hp</sub>	= High-pass Cut-off Frequency
f <sub>lp</sub>	= Low-pass Cut-off Frequency	f <sub>res</sub>	= Resonance Frequency
f <sub>ref</sub>	= Reference Frequency	Q	= Quality Factor
a	= Amplitude Slope/Decade		

Combining this equation with the amplitude sensitivity S<sub>ref</sub>, f<sub>ref</sub> and T<sub>ref</sub> gives you:

$$S(f, T) = S_{ref} \times \frac{S_{rel}(f, T)}{S_{rel}(f_{ref}, T_{ref})}$$

Implementation of this formula in either real-time data acquisition systems or in post-processing will support an automatic update of amplitude and/or phase.


## Triaxial Measurements

Types 4507-B-004, -B-005, -B-006 and 4507-C are equipped with three sets of mounting slots. These make it possible to perform triaxial measurements by successively mounting the accelerometer in three directions perpendicular to each other. This is easily done when the accelerometer is mounted in one of the mounting clips. However, it requires that the measurements take place on a non-variant system.

## Applications

The features of Types 4507 and 4508 make them ideal for modal analysis on ground vehicles, aircraft and satellites. These applications often involve large, composite structures that require multiple measurement points. Types 4507 and 4508 excel in such situations, providing ease of handling, reliability and fast calibration. With a rugged construction, Types 4507 and 4508 can also be used in a wide range of measurement environments. They also have low sensitivity to temperature transients, which is advantageous when it comes to making measurements at low frequencies.

## Compliance with Standards

	CE-mark indicates compliance with: EMC Directive and Low Voltage Directive. C-Tick mark indicates compliance with the EMC requirements of Australia and New Zealand
Safety	EN 61010–1 and IEC 61010–1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use. UL 3111–1: Standard for Safety – Electrical measuring and test equipment
EMC Emission	EN/IEC 61000–6–3: Generic emission standard for residential, commercial and light industrial environments. EN/IEC 61000–6–4: Generic emission standard for industrial environments. CISPR 22: Radio disturbance characteristics of information technology equipment. Class B Limits. FCC Rules, Part 15: Complies with the limits for a Class B digital device.
EMC Immunity	EN 50082–1: Generic immunity standard. Part 1: Residential, commercial and light industry. EN 50082–2: Generic immunity standard. Part 2: Industrial environment. <b>Note 1:</b> The above is guaranteed using Cable AO-1382 only. <b>Note 2:</b> Sensitivity to RF (in accordance with EN 50082–2) 4507, 4507-B, 4507-B-003, 4507-B-004, 4508, 4508-B and 4508-B-003: <60 µV 4507-001, 4507-B-001, 4508-001 and 4508-B-001: <10 µV 4507-002, 4507-B-002, 4507-B-005, 4507-B-006, 4508-002, 4508-B-002 and 4508-B-004: <100 µV
Temperature	IEC 68–2–1 & IEC 68–2–2: Environmental Testing. Cold and Dry Heat. Operating Temperature: 4507, 4507-001, 4507-B, 4507-B-001, 4507-B-003, 4507-B-004, 4508, 4508-001, 4508-B, 4508-B-001 and 4508-B-003: –54° to +121°C (–65° to +250°F) 4507-002, 4507-B-002, 4507-B-005, 4507-B-006, 4508-002, 4508-B-002 and 4508-B-004: –54° to +100°C (–65° to +212°F) 4507-C and 4508-C: –74° to +250°C (–101° to +482°F)

## Specifications – Miniature CCLD Accelerometer Type 4507

	Sensitivity	Sensitivity Tolerance	Measuring Range	Frequency Range, 10%	Phase Response, ± 5°	Built-in ID (TEDS)	Output Impedance	Bias Voltage	Start-up Time (± 10% of final bias)	Inherent Noise (broadband)/ Equivalent Vibration Level	Temperature Coefficient of Sensitivity	Sensing Element	Sealing	Humidity	Mounting Slots (pairs)	
Units	mV/ms <sup>-2</sup>	%	ms <sup>-2</sup>	Hz	Hz		Ω	V	s	μV	μg	%/°C			%	
4507	10	±5	700	0.3–6 k	2–5k	No	<30	13±1	5	<35	<350	0.09	PZ23	Hermetic	100	1
4507-001	1	±5	7000	0.1–6 k	0.5–5k	No	<30	13±1	50	<8	<800	0.09	PZ23	Hermetic	100	1
4507-002	100	±10	70	0.4–6 k	2–5k	No	<30	13±2	5	<150	<150	0.18	PZ27	Hermetic	100	1
4507-B	10	±5	700	0.3–6 k	2–5k	Yes	<30	13±1	5	<35	<350	0.09	PZ23	Hermetic	100	1
4507-B-001	1	±5	7000	0.1–6 k	0.5–5k	Yes	<30	13±1	50	<8	<800	0.09	PZ23	Hermetic	100	1
4507-B-002	100	±10	70	0.4–6 k	2–5k	Yes	<30	13±2	5	<150	<150	0.18	PZ27	Hermetic	100	1
4507-B-003	10	±5	700	0.3–6 k	2–5k	Yes	<30	13±1	5	<35	<350	0.09	PZ23	Hermetic	100	None
4507-B-004	10	±5	700	0.3–6 k	2–5k	Yes	<30	13±1	5	<35	<350	0.09	PZ23	Hermetic	100	3
4507-B-005	100	±10	70	0.4–6 k	2–5k	Yes	<30	13±2	5	<150	<150	0.18	PZ27	Hermetic	100	3
4507-B-006	50	±5	140	0.2–6 k	1–5k	Yes	<30	13±2	10	<80	<160	0.18	PZ27	Hermetic	100	3

## Specifications – Miniature CCLD Accelerometer Type 4508

	Sensitivity	Sensitivity Tolerance	Measuring Range	Frequency Range, ± 10%	Phase Response, ± 5°	Built-in ID (TEDS)	Output Impedance	Bias Voltage	Start-up Time (±10% of final bias)	Inherent Noise (broadband)/ Equivalent Vibration Level	Temperature Coefficient of Sensitivity	Ambient Temperature Range	Sensing Element	Sealing	Humidity	Mounting Slots (pairs)	
Units	mV/ms <sup>-2</sup>	%	ms <sup>-2</sup>	Hz	Hz		Ω	V	s	μV	μg	%/°C	°C			%	
4508	10	±5	700	0.3–8 k	2–5 k	No	<30	13±1	5	<35	<350	0.06	–54 to 121	PZ23	Hermetic	100	1
4508-001	1	±5	7000	0.1–8 k	0.5–5 k	No	<30	13±1	50	<8	<800	0.06	–54 to 121	PZ23	Hermetic	100	1
4508-002	100	±10	70	0.4–8 k	2–5 k	No	<30	13±2	5	<150	<150	0.12	–54 to 100	PZ27	Hermetic	100	1
4508-B	10	±5	700	0.3–8 k	2–5 k	Yes	<30	13±1	5	<35	<350	0.06	–54 to 121	PZ23	Hermetic	100	1
4508-B-001	1	±5	7000	0.1–8 k	0.5–5 k	Yes	<30	13±1	50	<8	<800	0.06	–54 to 121	PZ23	Hermetic	100	1
4508-B-002	100	±10	70	0.4–8 k	2–5 k	Yes	<30	13±2	5	<150	<150	0.12	–54 to 100	PZ27	Hermetic	100	1
4508-B-003	10	±5	700	0.3–8 k	2–5 k	Yes	<30	13±1	5	<35	<350	0.06	–54 to 121	PZ23	Hermetic	100	None
4508-B-004	50	±5	140	0.2–8 k	1–5 k	Yes	<30	13±2	10	<80	<160	0.12	–54 to 100	PZ27	Hermetic	100	1

## Specifications – Miniature Charge Accelerometer Types 4507 C, 4508 C

	Charge Sensitivity	Sensitivity Tolerance	Measuring Range	Frequency Range, $\pm 10\%$ <sup>a</sup>	Mounted Resonance Frequency	Transverse Sensitivity	Transverse Resonance	Min. Leakage Resistance at 20°C	Capacitance	Sensing Element	Base Strain Sensitivity (In base plane at 250 $\mu$ ε)	Temperature Transient Sensitivity (3 Hz LLF, 20dB/decade)	Magnetic Sensitivity (50 Hz – 0.03 T)	Ambient Temperature Range	Max. Operational Shock ( $\pm$ Peak)	Max. Operational Continuous sinusoidal acceleration (Peak)	Sealing	Humidity	Mounting Slots (pairs)	Weight
Units	pC/ms <sup>-2</sup>	%		Hz	kHz	%	kHz	G $\Omega$	pF		ms <sup>-2</sup> / $\mu$ ε	ms <sup>-2</sup> /°C	ms <sup>-2</sup> /T	°C	kms <sup>-2</sup>	kms <sup>-2</sup>		%		grams
4507-C	0.45	$\pm 15$	2 mms <sup>-2</sup> to 20 kms <sup>-2</sup>	0.1 to 6 k	18	<5	18	20	360	PZ23	0.005	0.2	1	–74 to 250	50	20	Welded	90	3	4.5
4508-C	0.45	$\pm 15$	2 mms <sup>-2</sup> to 20 kms <sup>-2</sup>	0.1 to 8 k	25	<5	18	20	360	PZ23	0.005	0.6	1	–74 to 250	50	20	Welded	90	1	4.5

<sup>a</sup> Using NEXUS Conditioning Amplifier Type 2692



## Common Specifications – Types 4507 and 4508 (CCLD only)

### DYNAMIC

Mounted Resonance Frequency:

**4507:** 18 kHz

**4508:** 25 kHz

**Transverse Sensitivity:** <5% of sensitivity

### ELECTRICAL

**Constant Current Supply:** 2 to 20 mA

Supply Voltage (unloaded):

+24 to +30 VDC (for full specification range)

Min. +18 VDC (reduced measuring range)

**Polarity:** Positive (for an acceleration in the direction of the engraved arrows)

### ENVIRONMENTAL

**Max. Non-destructive Shock ( $\pm$ Peak):** 50  $\text{kms}^{-2}$ ; 5000 g

Temp. Transient Sensitivity (3 Hz lower limiting frequency):

**4507:** 0.2  $\text{ms}^{-2}/^{\circ}\text{C}$

**4508:** 0.3  $\text{ms}^{-2}/^{\circ}\text{C}$

**Base Strain Sensitivity (mounted on adhesive tape 0.09 mm thick):**  
0.005  $\text{ms}^{-2}/\mu\text{e}$

**Magnetic Sensitivity:** 3  $\text{ms}^{-2}/\text{T}$

Temperature Range:

**4507, 4507-001, 4507-B, 4507-B-001, 4507-B-003, 4507-B-004, 4508, 4508-001, 4508-B, 4508-B-001 and 4508-B-003:**

–54° to +121°C (–65° to +250°F)

**4507-002, 4507-B-002, 4507-B-005, 4507-B-006, 4508-002,**

**4508-B-002 and 4508-B-004:**

–54° to +100°C (–65° to +212°F)

### PHYSICAL

**Case Material:** Titanium

**Sensing Element:** Piezoelectric

**Design Configuration:** ThetaShear

**Connector:** 10–32 UNF coaxial

**Dimensions (H×W×L):** 10×10×10 mm (0.4”), excl. connector

**Weight:** 4.8 gram (0.17 oz.)

**Note:** All values are typical at 25°C (77°F), unless measurement uncertainty is specified. All uncertainty values are specified at 2 $\sigma$  (i.e., expanded uncertainty using a coverage factor of 2)

## Ordering Information

Types 4507/4508: Miniature CCLD Accelerometers

Types 4507-B/4508-B :Miniature CCLD TEDS Accelerometers

Types 4507-C/4508-C: Miniature Charge Accelerometers

**Include the following accessories:**

- Carrying Box
- Individual Calibration Chart
- One Mounting Clip (not 4507-B-003 or 4508-B-003)

### OPTIONAL ACCESSORIES

AO-0531	Cable AC 0208 with 10–32 UNF to BNC connectors, 5 m (16.4 ft) –5 to 70°C (23 to 158°F)
AO-0463	Cable AC 0208 with 10–32 UNF connectors, 1.2 m (4 ft) –5 to 70°C (23 to 158°F)
AO-0038	Super low-noise Teflon cable, AC 0005 with 10–32 UNF connectors, 1.2 m (4 ft), 250°C (482°F)
AO-0122	Reinforced super low-noise cable, AC 0200 with 10–32 UNF connectors, 3 m (10 ft), 250°C (482°F)
AO-0406	Double-screened low-noise cable AC 0104 with 10–32 UNF connectors, 5 m (16 ft), 250°C (482°F). Includes adaptor JP 0145
AO-1419	Low-noise cable AC 0066 with 10–32 UNF connectors, 1.2 m (4 ft), 250°C (482°F)
AO-1382	Low-noise, double-screened Teflon cable AC 0104 with 10–32 UNF connectors, 1.2 m (4 ft), 200°C (392°F)

Cables AO-0038, AO-0122, AO-0406 and AO-1382 are recommended for use with Miniature Charge Accelerometers Types 4507-C and 4508-C

Different lengths of the cables are available

UA-1243	3×30 pieces of 1/2/3 markers for Cable AC-0104
UA-1244	As above, for Cable AC-0005 and AC-0208
YJ-0216	Mounting Wax
QS-0007	Cyanoacrylate Adhesive
WB-1372	DeltaTron Power Supply
UA-1407	Set of 100 Mounting Clips
DV-0459	Calibration Clip
UA-1418	Set of 25 dummy accelerometers for mass loading
UA-1478	Set of 100 swivel bases
UA-1475	Set of 100 mounting clips with thick base
UA-1564	Set of 5 high-temperature mounting clips
JP-0192	Solder connector adaptor

### CALIBRATION SERVICES

4507-CFF	Re-calibration (sensitivity)
4508-CFF	Re-calibration (sensitivity)

### TRADEMARKS

ICP is a registered trademark of PCB Group, Inc.

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice. © Brüel & Kjær. All rights reserved.

HEADQUARTERS: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S · DK-2850 Nærum · Denmark  
Telephone: +45 7741 2000 · Fax: +45 4580 1405 · www.bksv.com · info@bksv.com

Local representatives and service organisations worldwide

Brüel & Kjær 



### **A.IV.3 Martillo de Impacto**



# Product Data

## Impact Hammer — Type 8202

### USES:

- Impact testing for measuring frequency response functions, to be used for:
  - Dynamic structural testing such as modal analysis

### FEATURES:

- Individually calibrated force transducer that can be removed and used for other purposes
- Three different tips and an additional mass for tailoring the excitation spectrum
- Cable routed through hammer handle for protection
- Balanced design to maximize impact precision and minimize hammer bounce

### Introduction

The Impact Hammer Type 8202 is an instrumented hammer for testing structural behaviour when used in conjunction with a dual- or multichannel spectrum analyzer. An impact from such a hammer imparts to the test structure a smooth excitation spectrum over a broad frequency range. The force is measured by the built-in Force Transducer Type 8200 while the structural response is measured by separate means, for example an accelerometer fitted to the test object.

The frequency bandwidth of the first lobe of an impact's spectrum is inversely proportional to the width of the impulse. This is determined by the duration of the impact force, which in turn depends on factors such as the mass and structure of the hammer, and in particular the hardness of the contacting surfaces (the hammer tip and the impact area, see Fig. 1). The three different tips (steel, plastic and rubber, see Fig. 2) and the additional mass supplied with the Type 8202 enable the pulse duration to be varied from 0.2 ms to 5 ms with a maximum force of 5000 N (1124.10 lbf) on a massive, hard object.

The tip material, frequency range, pulse duration and the corresponding force ranges are given in Fig. 1. The force spectra obtained when impacting an aluminium plate using various hammer tips, with and without the additional mass, are shown in Fig. 4.

The Impact Hammer Type 8202 may be used to excite structures with

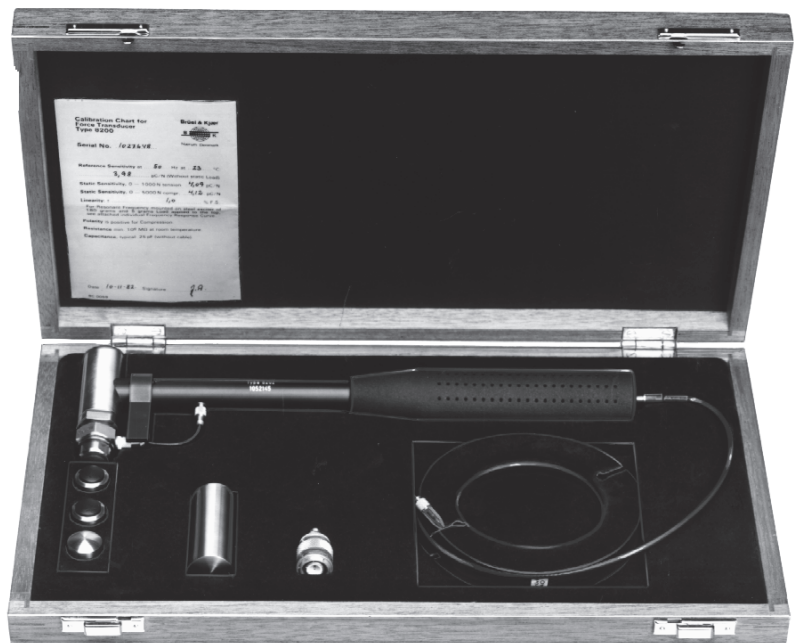
masses in the range of approximately 2 kg to 3000 kg (4.5 lb to 6600 lb). However, this range is very much dependent on the structure's mechanical properties and the mechanical background noise imparted to it by ambient conditions.

The construction of the hammer is extremely robust. The handle is of anodized aluminum, the hammer head and the additional mass are of stainless steel and the seatings of the plastic and rubber tips (which reduce lateral deformation of the tip material during impact) are of titanium. The miniature socket and cable from the force transducer to the hammer handle are protected by a clip-on

guard. The cable is conveniently led through the handle to the socket on the base of the handle.

The charge signal from the force transducer is reduced (by a factor of approximately 4) by a simple circuit within the handle to prevent the following amplifier from being overloaded. When used with Brüel & Kjær's Signal Analyzer Unit Type 2035 (part of Multichannel Analysis System Type 3550), the transducer signal can be connected directly to one of the analyzer's accelerometer inputs via a UNF to TNC cable (AO 0231).

The main specifications of the hammer are determined by the Force



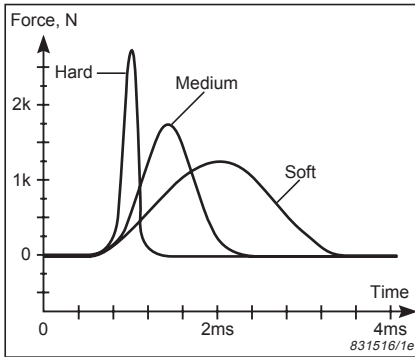


Fig.1 Impulse shape for various hardnesses of the hammer tip. As the tip becomes softer, the pulse becomes broader and lower in peak value (for a given impact area)

Transducer Type 8200. This small, permanently loaded transducer works on the piezoelectric effect and, when subjected to a compressive (or tensile) force, produces an electrical charge proportional to the force. Typical charge sensitivity for the force transducer is 4 pC/N (0.90 pC/lbf). The transducer is usable in the force range 1000 N tensile to 5000 N compressive (224.82 lbf to 1124.10 lbf) and may, if required, be removed from the hammer and used for other purposes.

The transducer has a rugged, all-welded, hermetically sealed construction with a ceramic insulated miniature socket sealed with molded glass. The piezoelectric element has a very low sensitivity to both long-term and transient temperature changes, enabling it to be used under very severe environmental conditions. The force transducer is securely screwed onto the hammer head, and the impact tip to the front of the force transducer.

## Calibration of the Force Transducer

Each Force Transducer Type 8200 is individually calibrated before it leaves the factory and a calibration chart is included with the Impact Hammer Type 8202. Due to the extreme stability of the piezoelectric element, the transducer should not need to be recalibrated during normal use.

## Calibration of the Impact Hammer

When using this type of hammer, the actual impact force applied to the test structure will always be greater than the force measured across the trans-



Fig.2 Impact Hammer Type 8202 with the plastic tip attached. The extra plastic tip, the steel tip, the rubber tip and the additional mass are also pictured

Tip	Frequency Range	Pulse Duration	Force Range
Steel	0 to 7 kHz	0.20 ms	500 N to 5000 N (112.41 lbf to 1124.10 lbf)
Steel + add. mass	0 to 4.5 kHz	0.23 ms	
Plastic	0 to 2 kHz	0.57 ms	300 N to 1000 N (67.45 lbf to 224.82 lbf)
Plastic + add. mass	0 to 1.3 kHz	0.76 ms	
Rubber	0 to 500 Hz	2.7 ms	100 N to 700 N (22.48 lbf to 157.37 lbf)
Rubber + add. mass	0 to 340 Hz	3.1 ms	

Table 1 Frequency range ( $-10$  dB point), pulse duration and force range for various hammer configurations when impacting a large steel plate

ducer because of the inertia of the tip. These forces are related as follows:

$$F_a/F_m = M/(M - M_t), \text{ where}$$

$F_a$  = actual force input to structure

$F_m$  = measured force

$M$  = effective mass of hammer plus tip

$M_t$  = effective mass of tip.

The effective mass is defined as the rigid mass which would have the same linear acceleration as the actual mass when acted upon by the same force. For a given hammer configuration and given test conditions, it is impossible to analytically determine the effective mass of the hammer's components. Therefore the hammer must be calibrated against one of the following:

- A standard transducer.
- A block of known mass.

The standard transducer method yields an absolute sensitivity for the

particular signal channel being calibrated. The "known mass" method (also called the ratio method) involves the measurement of the frequency response function for the entire measurement chain over the desired frequency range and is therefore preferable over the standard transducer method.

## Ratio Calibration of the Impact Hammer using a Block of Known Mass

A practical calibration set-up consists of a known mass suspended by strings to form a ballistic pendulum. An accelerometer is mounted on one side of the mass, and the opposite impact surface should ideally be similar to the actual test surface. The impact force, which is applied and directed through the center of gravity of the mass, can be determined directly from Newton's Second Law:

$$F = ma$$

where  $m$  is the known mass of the block and the attached accelerometer and  $a$  is the measured acceleration. Simultaneous measurement of the acceleration and force signals yields the inertance frequency response function (acceleration/force =  $1/\text{mass}$  = inertance, also called accelerance), which is compared to the known mass.

## Impact Testing

A very fast method of performing transient tests is to use a hand-held hammer to impact the structure. The force transducer built into the hammer measures the input force and an accelerometer mounted on the structure measures the response. The advantages of impact testing are:

- No elaborate fixture for the test structure.
- Small amount of equipment required.
- It is the fastest test method for low noise environments.
- It is ideal for use in restricted spaces where an exciter would not fit.
- Data consistency is maximized by minimal and constant mass loading of the test structure.

The disadvantages of impact testing are:

- It has a very high crest factor which may drive the test structure beyond its region of linear response. The method is therefore not suitable for inherently non-linear systems.
- Since there is little energy input to the system, the method has poor signal to noise characteristics. However, this problem can be greatly reduced by averaging and/or using time weighting functions.

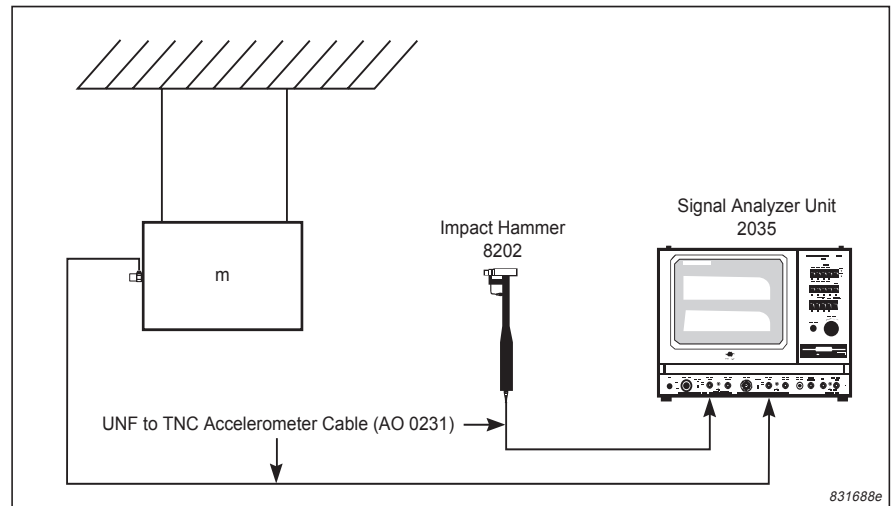


Fig. 3 Ratio calibration of the impact hammer using a ballistic pendulum consisting of a block of known mass and an accelerometer

- Special care must be taken to eliminate overloads and multiple impacts.

## Use of the Impact Hammer with Dual- or Multichannel Analyzers

The Brüel & Kjær Multichannel Analysis System Type 3550, available in dual- and multichannel configurations, has a number of features which make it ideally suitable for impact testing using the Impact Hammer Type 8202. These features include:

- Autoranging of the input attenuators for impulse measurements. This facility optimizes the signal to noise ratio.
- Automatic rejection of "overload" signals.
- A wide range of time weighting functions, including transient weighting for the force to improve signal to noise ratio, and exponential weighting for the response to reduce leakage effects and noise.
- Advanced triggering facility.

- Input module conditioning enables direct connection of the force and response transducers to the analyzer's accelerometer inputs via two UNF to TNC cables (AO 0231).
- Post-processing calibration enables adjustment of the force transducer's sensitivity to fit the value of  $1/m$ .

## Structural Analysis

The structural analysis capabilities of the impact hammer and Multichannel Analysis System Type 3550 combination can be greatly enhanced by the addition of a PC with a dedicated software package.

Brüel & Kjær can supply complete systems for structural analysis consisting of a source of excitation (either an impact hammer or one or more electromagnetic vibration exciters), a Dual- or Multichannel Analysis System, response transducers and preamplifiers and a desk-top computer with fully documented programs at two levels of sophistication.

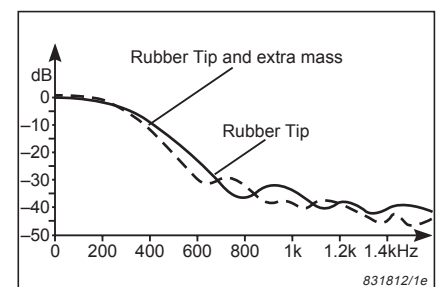
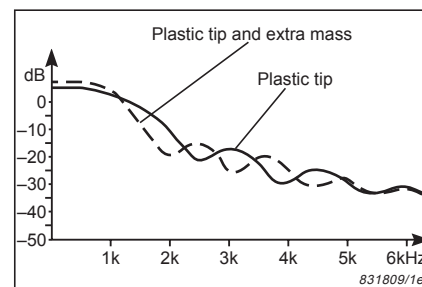
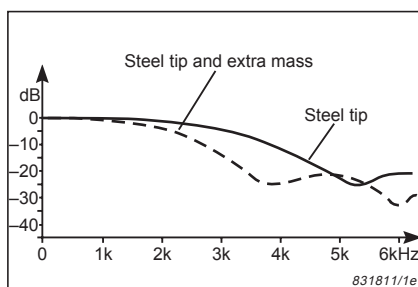


Fig. 4 Force spectra obtained when impacting an aluminum plate with Impact Hammer Type 8202 fitted with the steel, plastic and rubber tip (with and without the additional mass)

# Specifications 8202

## Force Transducer Type 8200

**CHARGE SENSITIVITY**\*† (nominal):

4 pC/N (0.90 pC/lbf)

### FORCE RANGE:

1000 N tensile to 5000 N compressive (224.8 lbf to 1124.1 lbf)

### LINEARITY‡:

<±1% of the maximum force or <±5% of the measured force, whichever is smaller

**TRANSVERSE SENSITIVITY:** 5%

## Hammer

**RANGE OF FORCE AND DURATION WHEN IMPACTING AGAINST MASSIVE STEEL USING:**

**Plastic Tip:** 300 N to 1000 N (67.5 lbf to 224.8 lbf), 1 ms to 0.5 ms

**Rubber Tip:** 100 N to 700 N (22.5 lbf to 157.4 lbf), 5 ms to 1.5 ms

**Steel Tip:** 500 N to 5000 N (112.4 lbf to 1124.1 lbf), 0.23 ms to 0.18 ms

**ATTENUATION FACTOR (nominal)**\*: 4

(Attenuation of signal from force transducer by circuitry in handle)

**CHARGE SENSITIVITY FOR FORCE TRANSDUCER INCL. HAMMER**# (nominal):

1 pC/N (0.22 pC/lbf)†

## Environmental

**DEFORMATION OF THE TRANSDUCER (8200) AT MAXIMUM FORCE:**

0.01 mm (0.0004 in)

**TEMPERATURE TRANSIENT SENSITIVITY (8200):** 0.5 N/°C (0.06 lbf/°F)

**OPERATING TEMPERATURE (Hammer):**

–10 to +55°C (+14 to +131°F)

**STORAGE TEMPERATURE (Hammer):**

–25 to +70°C (–13 to +158°F)

\* Individual values are given on the calibration chart supplied

† Measurement uncertainty: ±1.9%

# Measurement uncertainty: ±2.0%

## Dimensions and Weight

**LENGTH OF:**

**Hammer:** 255 mm (10.0 in)

**Handle:** 130 mm (5.1 in)

**Hammer Head:** 52.5 mm (2.1 in)

**DIAMETER OF:**

**Hammer Head:** 20 mm (0.8 in)

**Additional Mass:** 20 mm (0.8 in)

**Handle:** 30 mm (1.2 in)

**WEIGHT OF:**

**Hammer Handle & Head:** 280 g (9.9 oz)

**Additional Mass:** 122 g (4.3 oz)

**Plastic Tip:** 3.9 g (0.14 oz)


**Rubber Tip:** 4.1 g (0.14 oz)

**Steel Tip:** 10.3 g (0.36 oz)

**Force Transducer:** 21 g (0.74 oz)

**Note:** All values are typical at 25°C (77°F), unless measurement uncertainty is specified. All uncertainty values are specified at 2σ (i.e. expanded uncertainty using a coverage factor of 2)

## COMPLIANCE WITH STANDARDS:

	CE-mark indicates compliance with: EMC Directive.
<b>Safety</b>	EN 61010–1 and IEC 1010–1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use.
<b>EMC Emission</b>	EN 50081–1: Generic emission standard. Part 1: Residential, commercial and light industry. EN 50081–2: Generic emission standard. Part 2: Industrial environment. CISPR 22: Radio disturbance characteristics of information technology equipment. Class B Limits. FCC Rules, Part 15: Class B limits.
<b>EMC Immunity</b>	EN 50082–1: Generic immunity standard. Part 1: Residential, commercial and light industry. EN 50082–2: Generic immunity standard. Part 2: Industrial environment. <b>Note:</b> The above is guaranteed using accessories listed in this Product Data sheet only.
<b>Temperature</b>	IEC 68–2–1 & IEC 68–2–2: Environmental Testing. Cold and Dry Heat. Operating Temperature: –10 to +55°C (+14 to +131°F) Storage Temperature: –25 to +70°C (–13 to +158°F)
<b>Humidity</b>	IEC 68–2–3: Damp Heat: 90% RH (non-condensing at 40°C (104°F))
<b>Mechanical</b>	Non-operating: IEC 68–2–6: Vibration: 0.3 mm, 20 m/s <sup>2</sup> , 10–500 Hz IEC 68–2–27: Shock: 1000 m/s <sup>2</sup> IEC 68–2–29: Bump: 3000 bumps at 250 m/s <sup>2</sup> (in three directions)
<b>Enclosure</b>	IEC 529: Protection Provided by Enclosures: IP67

# Ordering Information

**Type 8202** Impact Hammer  
**Includes the following accessories:**

DA 1195: Additional Mass

2×UC 5259: Plastic Tip

UC 5256: Rubber Tip

DD 0343: Steel Tip

DH 0476: Cable Protector

AO 0262: Short Cable (6 cm (2.4 in))

JP 0162: Microdot to TNC Input Adaptor

AO 0122: Reinforced Cable (3 m (9.8 ft))

## Optional Accessories for Structural Analysis

Various vibration exciters, accelerometers & preamplifiers, plus:

**Type 8203:** Force Transducer/Impact Hammer

**Type 2035:** Signal Analyzer Unit (part of Multichannel Analysis System Type 3550)

**Type 3551:** Multichannel Data Acquisition System

**Type 2148:** Dual Channel Portable Signal Analyzer

Types 2035 (3550), 3551, and 2148 can be used in conjunction with a PC and the following dedicated software package developed by LMS International and available from Brüel & Kjær:

**WT 9241/42 CADA-PC Modal Software:** for use with IBM AT or PS/2 compatible computers and MS-Windows. A Multiple Input/Multiple Output (MIMO) modal analysis program providing poly-reference curve-fitting for separating repeated modes.

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice

# Brüel & Kjær

WORLD HEADQUARTERS:

DK-2850 Naerum · Denmark · Telephone: +45 45 80 05 00 · Fax: +45 45 80 14 05 · Internet: <http://www.bk.dk> · e-mail: [info@bk.dk](mailto:info@bk.dk)

Australia (02) 9450-2066 · Austria 00 43-1-865 74 00 · Belgium 016/44 92 25 · Brazil (011) 246-8166 · Canada: (514) 695-8225 · China 10 6841 9625 / 10 6843 7426

Czech Republic 02-67 021100 · Finland 90-229 3021 · France (01) 69 90 69 00 · Germany 0610 3/908-5 · Holland (0)30 6039994 · Hong Kong 254 8 7486

Hungary (1) 215 83 05 · Italy (02) 57 60 4141 · Japan 03-3779-8671 · Republic of Korea (02) 3473-0605 · Norway 66 90 4410 · Poland (0-22) 40 93 92 · Portugal (1) 47114 53

Singapore (65) 275-8816 · Slovak Republic 07-37 6181 · Spain (91) 36810 00 · Sweden (08) 71127 30 · Switzerland 01/94 0 09 09 · Taiwan (02) 713 9303

United Kingdom and Ireland (0181) 954-236 6 · USA 1 - 800 - 332 - 2040

Local representatives and service organisations worldwide

BP 0385 – 14

#### **A.IV.4 Amplificador de carga**



# PRODUCT DATA

## Charge to DeltaTron<sup>®</sup> Converters — Types 2647, 2647-A, 2647-B, 2647-C, 2647-D, 2647-D-001, 2647-D-002, 2647-D-003 and 2647-D-004

*All types are Charge to DeltaTron Converters intended to connect charge transducers to DeltaTron inputs.*

*All types support IEEE 1451.4 “A Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators” and contain a unique identification code and TEDS*



### Features and Benefits

#### Features (general)

- Converts charge transducers to be used with DeltaTron power supplies. Compatible with ICP<sup>®</sup>, ISOTRON<sup>®</sup>, PIEZOTRON<sup>®</sup>, CCLD, etc.
- Supports “Smart Transducer Interface” IEEE 1451.4 containing TEDS (Transducer Electronic Data Sheet)
- Can also be used with DeltaTron conditioning amplifiers that do not support IEEE 1451.4

#### Features (Type 2647)

- Active mode with two gain settings
- Passive mode allows connection of up to 4 units in parallel

#### Features (Types 2647-A, 2647-B, 2647-C, 2647-D and 2647-D-00x)

- Fixed sensitivity:
  - 2647-A, 2647-D, 2647-D-00x: 1 mV/pC
  - 2647-B: 10 mV/pC
  - 2647-C: 0.1 mV/pC

#### Features (Types 2647-D-001 and 2647-D-003)

- For use with accelerometers that have a 2-pin TNC connector
- 2-pin TNC (F) to BNC (F)
- 10 m integral cable

#### Features (Type 2647-D-004)

- 2-pin TNC (F) to LEMO (M)
- For use with accelerometers that have a 2-pin TNC connector
- For use with Type 2250 or 2270

#### Benefits

- Reduced setup and measurement time
- Fewer instruments in user's instrument pool
- Plug and play between charge transducers/converter pairs
- Easy field installation and configuration
- Charge transducers can be given identification via TEDS
- Reduced human error during measurements
- Individual production/calibration data stored in TEDS

## Description of Types 2647-A, 2647-B, 2647-C, 2647-D and 2647-D-00x

Type No.	Gain (mV/pC)	Extended Functionality <sup>a</sup>	Lower Limiting Frequency (−10%, −1 dB)	Upper Limiting Frequency (−10%, −1 dB)
2647	1 and 10	Yes	0.17 Hz	50 kHz
2647-A	1	No		
2647-B	10	No		
2647-C	0.1	No	1.0 Hz	10 kHz <sup>b</sup>
2647-D	1	No		
2647-D-001 <sup>c</sup>		No		
2647-D-002		No	80 Hz	
2647-D-003 <sup>‡</sup>		No		
2647-D-004 <sup>d</sup>		No		

<sup>a</sup> Switch between gain 1, 10 and passive mode

<sup>b</sup> Depends on input load capacitance. Figures apply to 1.5 nF (for example, 1 nF accelerometer capacitance plus 5 m cable)

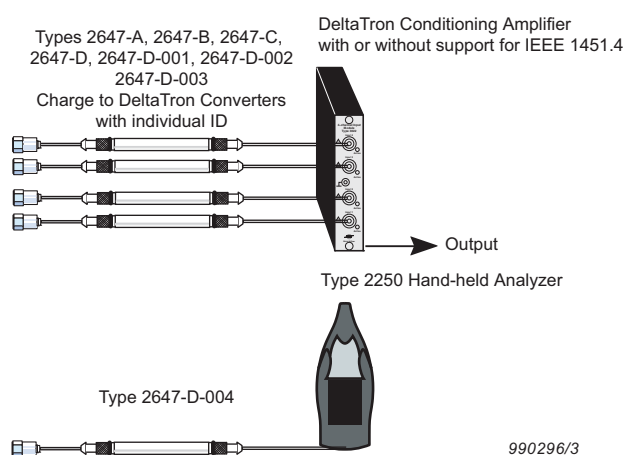
<sup>c</sup> Cable integrated for use with accelerometers that have a 2-pin TNC connector, BNC connector (F)

<sup>d</sup> Cable integrated for use with accelerometers that have a 2-pin TNC connector, 2250 LEMO connector (M)

Types 2647-A, B, C, D and D-00x connect charge transducers to DeltaTron inputs. The converters are contained in small  $\varnothing 7 \times 37.7$  mm stainless steel tubes, weigh less than 6.3 g (0.25 oz.) and are equipped with a 10–32 UNF connector at each end. A special mounting clip, DV-0467, is supplied (except for Type 2647-D-00x) and can be used to hold and insulate the converter from the supporting surface. The clips can be fixed together in order to keep the measurement setup tidy.

All of the converters support IEEE 1451.4 “A Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators” and contain a unique identification code and TEDS.

**Fig. 1**  
Connecting converters to a conditioning amplifier with or without IEEE 1451.4 support



They can also be used as simple converters in connection with DeltaTron equipment that does not support IEEE 1451.4 (see Fig. 1), for example, DeltaTron Power Supply WB-1372, Accelerometer Power Supply ZG-0328 or Measuring Amplifier Type 2525.

**Note:** NEXUS and the range of Type 2694 Conditioning Amplifiers support IEEE 1451.4 for transducers only. Therefore, when using these converters with NEXUS or Type 2694, you need to enter the combined sensitivity of the charge transducer and the converter in NEXUS using the same procedure as for transducers that do not support TEDS.

Types 2647-A, B, C and D are delivered in boxed sets of up to 4 units.

The various converter sensitivities enable a wide range of charge accelerometers to be adapted to the vibration levels to be measured. With a TEDS editor (see Fig. 5), the contents of the TEDS can be read. The built-in, unique identification code (ID) enables you to locate and verify a given converter in the measurement setup. There is also space to write a comment (up to 15 ASCII characters).

## Description of Type 2647

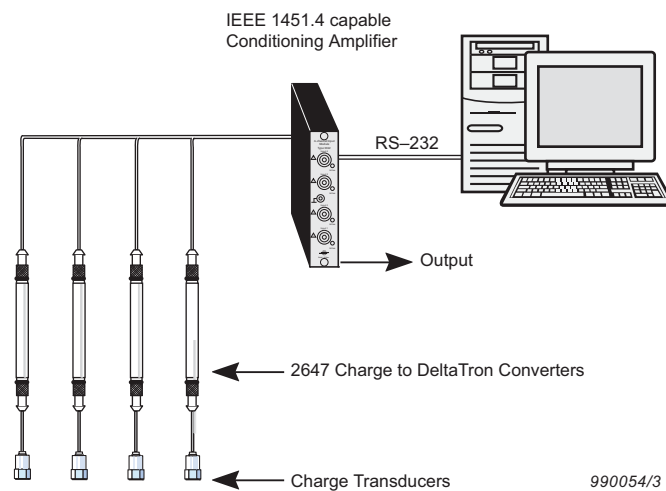
Type 2647 is similar to Types 2647-A, B, C and D. The important difference is that with Type 2647, in addition to the normal IEEE 1451.4 features, you can remotely set the sensitivity to either 1 or 10 mV/pC or turn the unit off (passive, high-impedance mode, see later).

Type 2647 can also be used as a simple converter (default mode) with 1 mV/pC sensitivity in connection with DeltaTron equipment that does not support IEEE 1451.4.

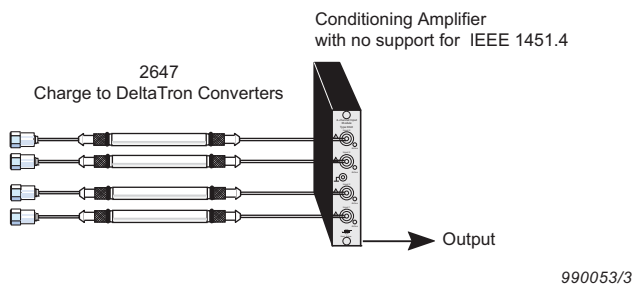


The two gains in Type 2647 enable a wide range of charge accelerometers to be adapted to the vibration levels to be measured. The passive mode enables up to 4 converters to be connected in parallel on the same coaxial cable (see Fig.2). By means of a TEDS editor (see Fig.6), the signal from one of the converters can be selected and conditioned, thus providing a multiplexing function. The built-in, unique identification code (ID) enables you to locate and verify a given converter in the measurement setup. There is also space to write a comment (up to 11 ASCII characters).

**Fig. 2**  
Connecting four Type 2647 to a single input on a IEEE 1451.4 capable conditioning amplifier with support for extended functionality, that is, the ability to control the switch in the amplifier. In this setup one Type 2647 is in active mode while the other three are in passive mode



**Fig. 3**  
Connecting four Type 2647 to a conditioning amplifier with no or limited (no extended functionality) IEEE 1451.4 support. In this default mode only the 1 mV/pC sensitivity is available



**Note:** The IEEE 1451.4 facilities in Type 2647 require an adaptor and software support from a TEDS editor installed on a host, like a PC. See “Optional Accessories” for further details.

## Description of Types 2647-D-001, 2647-D-003 and 2647-D-004

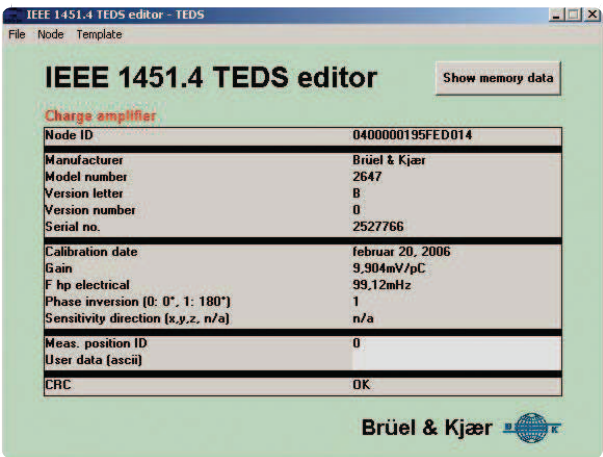
Types 2647-D-001, 2647-D-003, 2647-D-004 are similar to 2647-D except that they have an integral cable. Types 2647-D-001 and 2647-D-003 have a 2647-D or 2647-D-002 moulded inside the cable with 1 m of cable on one side, terminating in a BNC connector (F), and 9 m on the other, terminating in a TNC connector. 2647-D-004 has a similar configuration, except that it has a Type 2250 LEMO connector instead of BNC.

**Fig. 4**  
2647-D-001 integrated with a cable



IEEE 1451.4

Fig. 5  
TEDS editor used to show the contents of the Transducer Electronic Data Sheet for Types 2647-A, B, C and D



IEEE 1451.4 is a mixed-mode smart transducer communication protocol based on existing analogue connections using a coaxial cable. It also specifies Transducer Electronic Data Sheets (TEDS) formats for interfacing analogue transducers with additional, smart features to legacy systems. The scope of this standard is to allow analogue transducers to communicate digital information with an IEEE1451 object. Over 20 templates have been defined to date. The general template used in Types 2647-A, B, C and D is UTID257 (Unique Template IDentifier). The general template in Type 2647 is UTID 385.

Fig. 6  
TEDS editor used with Type 2647

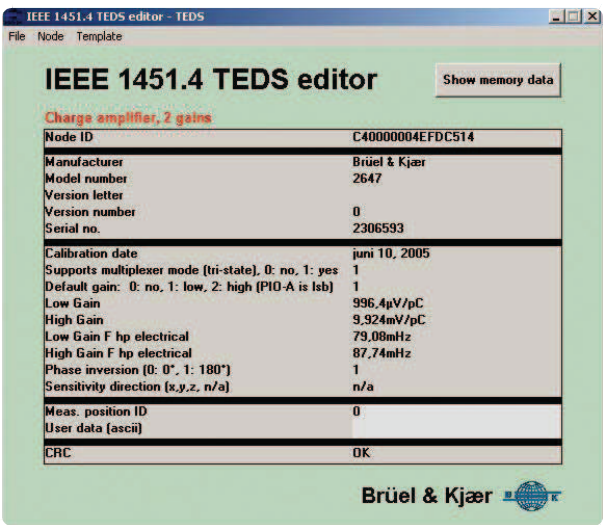
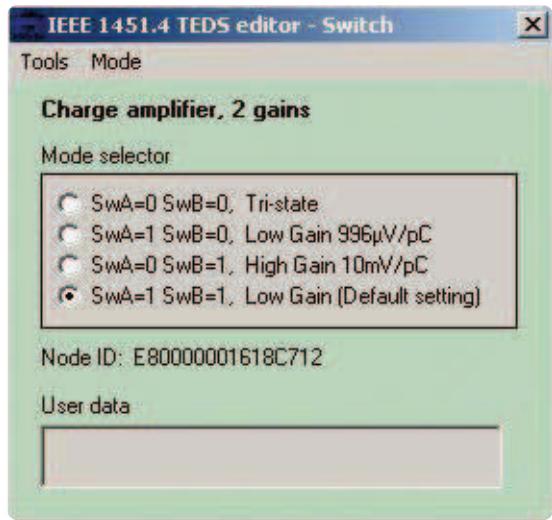




Fig. 7 .  
Switch control window used with Type 2647



Even if the equipment does not support IEEE 1451.4 with extended functionality, it is possible to make use of both gain settings. With TEDS Editor BZ-5294, MicroLAN Adaptor WQ-1320, Cable WL-1363, Adaptor JP-0145 and Microdot Cable AO-0038 it is possible to select the desired gain, as illustrated in Fig. 7, and then disconnect Type 2647 and reconnect it to the measuring system. If you change systems within 30 seconds, the converter will remember the setting. (Otherwise it may forget its setting and return to the default setting of 1 mV/pC.) The measuring system must be powered up and ready to accept the device.

## Compliance with Standards

 	CE-mark indicates compliance with: EMC Directive and Low Voltage Directive. C-Tick mark indicates compliance with the EMC requirements of Australia and New Zealand.
<b>Safety</b>	EN/IEC 61010-1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use. ANSI/UL 61010-1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use.
<b>EMC Emission</b>	EN/IEC 61000-6-3: Generic emission standard for residential, commercial and light industrial environments. EN/IEC 61000-6-4: Generic emission standard for industrial environments. EN/IEC 61326: Equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements. CISPR 22: Radio disturbance characteristics of information technology equipment. Class B Limits. FCC Rules, Part 15: Complies with the limits for a Class B digital device.
<b>EMC Immunity</b>	EN/IEC 61000-6-1: Generic standards – Immunity for residential, commercial and light industrial environments. EN/IEC 61000-6-2: Generic standards – Immunity for industrial environments. EN/IEC 61326: Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements. <b>Note:</b> The above is only guaranteed using accessories listed in this Product Data sheet.
<b>Temperature</b>	IEC 60068-2-1 & IEC 60068-2-2: Environmental Testing. Cold and Dry Heat. Operating Temperature: -40 to +85°C (-40 to 185°F) Storage Temperature: -40 to +85°C (-40 to 185°F) IEC 60068-2-14: Change of Temperature: -10 to + 55°C (2 cycles, 1°C/min.)
<b>Humidity</b>	IEC 60068-2-3: Damp Heat: 90% RH (non-condensing at 40°C (104°F)).
<b>Mechanical</b>	Operating (peak values) MIL-STD-819C: Vibration: 12.7 mm, 15 m/s <sup>2</sup> , 5–500 Hz Non-operating: IEC 60068-2-6: Vibration: 1 mm, 150 m/s <sup>2</sup> , 10–500 Hz IEC 60068-2-27: 30 km/s <sup>2</sup> /250 μs IEC 60068-2-29: Bump: 4000 bumps at 400 m/s <sup>2</sup> IEC 60068-2-32: Drop: 10 times in 3 directions
<b>Enclosure</b>	IEC 60529 (1989): Protection provided by enclosures: IP 43.

## Specifications – Charge to DeltaTron Converters Types 2647, 2647-A/B/C/D/D-001/D-002/D-003/D-004

### INPUT (2647/2647-A/-B/-C/-D/-D-002)

- Coaxial (10 – 32 UNF) female, stainless steel
- Single ended for piezoelectric charge transducers
- Protected to max. 300 nC peak, and against input/output reversal (input marked with a ring)

### OUTPUT (2647/2647-A/-B/-C/-D/-D-002)

- Coaxial (10 – 32 UNF) female, stainless steel
- Single ended DeltaTron

### INPUT (2647-D-001/-D-003/-D-004)

- 2-pin TNC (F), stainless steel

### OUTPUT (2647-D-001/-D-003/-D-004)

- BNC (F), stainless steel
- LEMO (M)

### MECHANICAL

**Dimensions:** 2647: Ø7 × 77.7 mm (Ø0.27 × 3.06")  
2647-A, B, C, D, D-002: Ø7 × 37.7 mm (Ø0.27 × 1.48")  
**Case:** Stainless steel tube

**Weight:** 2647: Max. 11 g (0.4 oz.) (with holder)  
2647-A, B, C, D, D-002: Max. 6.3 g (0.25 oz.) (with holder)  
2647-D-001/D-003: Max. 580 g (20.5 oz.)  
2647-D-004: Max. 380 g (13.4 oz.)

### Common Specifications

**Phase:** Inverted

**Current Range:** 4 – 20 mA

**Supply Voltage (Unloaded):** 24 to 28 V<sub>DC</sub> for full specification range and 18 V<sub>DC</sub> with reduced measuring range

**Bias Voltage:** 13 V ±1 V over the full temperature and current range

**Max. Output Voltage Swing:** 14 V Peak to Peak

**Output Impedance:** < 40 Ω

### ENVIRONMENTAL

**Susceptibility to Vibration (10 – 500 Hz):** Typically <50 μV/ms<sup>-2</sup> referred to output

**Susceptibility to 50/60 Hz Magnetic Fields:** <30 mV/T (3 μV at 80 A/m) referred to output

**Radiation:** 10<sup>4</sup> RAD (γ) non-destructive

	Types 2647-A and 2647-B	Types 2647-C, 2647-D and 2647-D-001
<b>Lower Limiting Frequency: (1st order, -10%) at 1 nF transducer capacitance</b>	0.17 Hz	1.0 Hz
<b>Upper Limiting Frequency: (-10%)<sup>a</sup></b>	> 50 kHz <sup>b</sup>	10 kHz
<b>Phase Match<sup>c</sup></b>	±1° (3 Hz to 1 kHz)	±1° (15 Hz to 200 Hz)

<sup>a</sup> At 1.5 nF transducer capacitance, 4 mA supply current and 2 V peak out

<sup>b</sup> At 1 nF transducer capacitance

<sup>c</sup> Between units with same range selected and with same environmental conditions

## Types 2647-A, 2647-B, 2647-C, 2647-D, 2647-D-00x

### TRANSFER

#### Nominal Sensitivity:

**2647-A, D, D-00x:** 1 mV/pC  $\pm 2.5\%$

**2647-B:** 10 mV/pC  $\pm 2.5\%$

**2647-C:** 0.1 mV/pC  $\pm 2.5\%$

The actual sensitivity values as delivered from production are present in the TEDS

**Temperature Coefficient:** 0  $\pm 100$  ppm/K.

**Inherent Noise Voltage Referred to Input:** (at 1 nF input load capacitance):

	0.1 mV/pC	1 mV/pC	10 mV/pC
1 Hz – 22.4 kHz	Typ. 300 $\mu$ V	Typ. 10 $\mu$ V	Typ. 6 $\mu$ V
22.4 Hz – 22.4 kHz	<40 $\mu$ V, Typ. 2.5 $\mu$ V	<8 $\mu$ V, Typ. 4.5 $\mu$ V	<5 $\mu$ V, Typ. 2.5 $\mu$ V

**Inherent Noise Voltage Density Referred to Input:** (at 1 nF input load capacitance):

0.1 mV/pC	1 mV/pC	10 mV/pC
Typ. 6 $\mu$ V/Hz <sup>1/2</sup>	Typ. 400 nV/Hz <sup>1/2</sup>	Typ. 200 nV/Hz <sup>1/2</sup> at 10 Hz
Typ. 400 nV/Hz <sup>1/2</sup>	Typ. 100 nV/Hz <sup>1/2</sup>	Typ. 50 nV/Hz <sup>1/2</sup> at 100 Hz
Typ. 250 nV/Hz <sup>1/2</sup>	Typ. 50 nV/Hz <sup>1/2</sup>	Typ. 25 nV/Hz <sup>1/2</sup> at 1 kHz

**THD (2 Hz – 22 kHz):** <0.1% at 1 V RMS output

#### Recovery Time from Overload:

<100 s at 10 mV/pC sensitivity (bias within  $\pm 1$  V of final value)

<10 s at 1 mV/pC sensitivity (bias within  $\pm 1$  V of final value)

<2 s at 0.1 mV/pC sensitivity (bias within  $\pm 1$  V of final value)

#### IEEE 1451.4

Includes ID and TEDS

**User Comment Field:** 15 ASCII characters

## Type 2647

### TRANSFER

**Sensitivity:** Nominal 1 or 10 mV/pC  $\pm 2.5\%$  (Remote selectable)

The actual sensitivity values as delivered from production are present in the TEDS

**Temperature Coefficient:** 0  $\pm 100$  ppm/K

**Default Sensitivity:** 1 mV/pC (with no IEEE 1451.4 support or when first powered on)

**Inherent Noise Voltage Referred to Input:** (at 1 nF input load capacitance):

	1 mV/pC	10 mV/pC
1 Hz – 22.4 kHz	Typ. 20 $\mu$ V	Typ. 12 $\mu$ V
22.4 Hz – 22.4 kHz	<10 $\mu$ V, Typ. 6 $\mu$ V	<7 $\mu$ V, Typ. 4 $\mu$ V

**Inherent Noise Voltage Density Referred to Input:** (at 1 nF input load capacitance):

1 mV/pC	10 mV/pC
Typ. 800 nV/Hz <sup>1/2</sup>	Typ. 400 nV/Hz <sup>1/2</sup> at 10 Hz
Typ. 200 nV/Hz <sup>1/2</sup>	Typ. 100 nV/Hz <sup>1/2</sup> at 100 Hz
Typ. 100 nV/Hz <sup>1/2</sup>	Typ. 50 nV/Hz <sup>1/2</sup> at 1 kHz

**THD (2 Hz – 22 kHz):** <0.1% at 1 V RMS output

**Crosstalk between an Active and a Passive Unit:** Typ. <-100 dB at 20 kHz

#### Recovery Time from Overload:

<100 s at 10 mV/pC sensitivity, (bias within  $\pm 1$  V of final value)

<10 s at 1 mV/pC sensitivity, (bias within  $\pm 1$  V of final value)

### EXTENDED FUNCTIONALITY

**Sensitivity Selection:** 1 mV/pC, 10 mV/pC Passive Mode Selection (e.g., for parallel connection of units)

**Current Consumption in Passive Mode:** <200  $\mu$ A

#### IEEE 1451.4

Includes ID, TEDS and Extended Functionality

**User Comment Field:** 11 ASCII characters

### **A.IV.5 Calibrador de vibraciones**

# PRODUCT DATA

## Calibration Exciter Types 4294 and 4294-002

### Uses

- Precise field calibration of vibration transducers
- Rapid calibration and checking
- Quick, easy field calibration of vibration measurement and recording systems

### Features

- Small, lightweight, and battery-driven
- Leather case for impact protection
- Designed for everyday use in harsh environments
- Acceleration, velocity and displacement calibration
- High-precision, crystal-controlled servo operating at 159.15 Hz ( $1000 \text{ rad s}^{-1}$ )
- Drop- and environment-tested according to IEC 60068
- Splash-proof according to IP 54 (IEC 60529)



### Description

Type 4294 permits accurate adjustment of measuring instrumentation at a standard acceleration level of  $10 \text{ ms}^{-2}$  (0 – 70 g load). The reference signal may additionally be used for velocity and displacement calibration, at  $10 \text{ mms}^{-1}$  and  $10 \mu\text{m}$ , respectively.

Type 4294-002 permits accurate adjustment of measuring instrumentation at a standard acceleration level of  $3.16 \text{ ms}^{-2}$  (0 – 200 g load). The reference signal may additionally be used for velocity and displacement calibration, at  $3.16 \text{ mms}^{-1}$  and  $3.16 \mu\text{m}$ , respectively.

The calibrator embodies an electromagnetic exciter driven by a crystal oscillator at a frequency of 159.15 Hz ( $1000 \text{ rad s}^{-1}$ ). Servo feedback via a small accelerometer on the underside of the vibration table is used to maintain a constant and accurate vibration level independent of the mass of the transducer under test (70 g for Type 4294 and 200 g for Type 4294-002).

To prevent overload, power for the calibrator is automatically disconnected if a transducer mass above a certain level is mounted on the table (70 g for Type 4294 and 200 g for Type 4294-002).

Use of the calibrator is very straightforward. The transducer is conveniently attached to the calibrator table using a 10–32 UNF Steel Stud (YQ-2962). Alternatively, the 10 g Mounting Disc (DB-2996) supplied, provides a convenient means of attaching transducers manufactured with 3 mm threads or those fitted with Mounting Magnet UA-0642. The mounting disc also permits the attachment of transducers with either beeswax or cyanoacrylate adhesive.

The calibrator is actuated by pressing the small button on the side of its housing. Following system adjustment, the calibrator is switched off by pressing the button a second time. To prolong the useful life of its built-in battery, Type 4294 automatically switches off after approximately 100 seconds.



## Specifications – Calibration Exciter Types 4294 and 4294-002

	4294	4294-002
Dynamic Characteristics		
Frequency (Hz)	159.15 ± 0.02%	
Acceleration (ms <sup>-2</sup> (RMS))	10 ± 3%	3.16 ± 3%
Velocity (mms <sup>-1</sup> (RMS))	10 ± 3%	3.16 ± 3%
Displacement (μm)	10 ± 3%	3.16 ± 3%
Transverse Amplitude	< 5% of main axis amplitude	
Distortion	4294:< 2% for 10 to 70 g 4294-002: < 2% for 10 to 200 g load 4294 & 4294-002: typical < 7% for 0 to 10 g. Use DB-2996 (10 g) with very light accelerometers to achieve 2% distortion	
Power Requirements		
Built-in Battery	One 9V Alkaline Battery QB- 0016 (IEC type 6LR61)	
Battery Life	Approx. 200 calibrations, each lasting 100 s with automatic switching off at the end of each calibration	
Warm-up Time (Seconds)	< 5	
Signal Duration (Seconds)	103 ± 1 s with automatic stop	
Long-term Stability	Better than 1% per year for acceleration, velocity and displacement; better than 10 ppm per year for frequency	
Physical Characteristics		
Length	from bottom to top of hex screw: 135 mm (5.3 in) – see Fig. 1	
Diameter	with case: 46 mm ( 1.8 in), without case: 43.5 mm (1.7 in)	
Weight	500 g (17.6 oz) including battery and leather case	
Transducer Mounting		
Maximum Load (g)	70	200
Mounting Torque (Nm)	max. 0.5	
Mounting Thread	10–32 UNF	

### COMPLIANCE WITH STANDARDS



EMC Directive and Low Voltage Directive; EMC requirements of Australia and New Zealand

**Safety:** EN/IEC 61010–1; UL 61010B–1

**EMC Emission:** EN/IEC 61000–6–3; EN/IEC 61000–6–4; CISPR 22: Radio disturbance characteristics of information technology equipment. Class B Limits; FCC Rules, Part 15: Complies with the limits for a Class B digital device

**EMC Immunity:** EN/IEC 61000–6–1; EN/IEC 61000–6–2; EN/IEC 61326 (**Note:** Only guaranteed using accessories listed in this product data)

**Temperature:** IEC 60068–2–1 & IEC 60068–2–2:

- Operating Temperature: +10 to +40°C (50 to 104°F) for 10  $\text{ms}^{-2}$  reference within ± 3% and 3.16  $\text{ms}^{-2}$  reference within ± 3%

- 10 to +55°C (14 to 131°F) for 10  $\text{ms}^{-2}$  reference within ± 5% and 3.16  $\text{ms}^{-2}$  reference within ± 5%

- Storage Temperature: –25 to +70°C (–13 to 158°F)

- IEC 60068–2–14, Change of temperature: –10 to +55°C (2 cycles, 1°C/min)

**Humidity:** IEC 60068–2–78: Damp Heat: 90% RH (non-condensing at 30°C (86°F))

**Mechanical:** Non-operating:

- IEC 60068–2–6: Vibration: 0.3 mm, 20  $\text{m/s}^2$ , 10 – 500 Hz

- IEC 60068–2–27: Shock: 1000  $\text{m/s}^2$

- IEC 60068–2–29: Bump: 1000 bumps at 400  $\text{m/s}^2$

**Enclosure:** IEC 60529: Protection provided by enclosures: IP 54

Fig. 1 Dimensions of Type 4294/4294-002 without leather case



## Ordering Information

Type 4294 Calibration Exciter (70 g load)  
Type 4294-002 Calibration Exciter (200 g load)

Types 4294 and 4294-002 include the following accessories:

- Leather Case
- QB-0016: 9 V Battery
- YQ-2962: 10–32 UNF Steel Stud
- DB-2996: Mounting Disc Adaptor
- Calibration Chart

### OPTIONAL ACCESSORIES

4294-CAI	Accredited Initial Calibration
4294-CAF	Accredited Calibration
4294-EW1	Extended Warranty, one year extension
4294-002-CAI	Accredited Initial Calibration
4294-002-CAF	Accredited Calibration
4294-002-EW1	Extended Warranty, one year extension

### RE-CALIBRATION

Periodic re-calibration of Type 4294 is recommended in order to maintain the high accuracy of the vibration unit, and in order to have proof of traceability. Depending on the application, a re-calibration every 1–3 years is recommended.

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice. © Brüel & Kjær. All rights reserved.

HEADQUARTERS: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S · DK-2850 Nærum · Denmark  
Telephone: +45 7741 2000 · Fax: +45 4580 1405 · www.bksv.com · info@bksv.com

Local representatives and service organisations worldwide

Brüel & Kjær





#### **A.IV.6 Dinamómetro**

**3-Komponenten-Werkzeughalter-Dynamometer  $F_x, F_y, F_z$**   
**Dynamomètre porte-outil à 3 composantes  $F_x, F_y, F_z$**   
**3-Component Toolholder Dynamometer  $F_x, F_y, F_z$**

**9121, 9151A..., 9153A..., 9155A...**

Quarz-3-Komponenten-Dynamometer zum Messen der drei orthogonalen Komponenten einer Kraft.

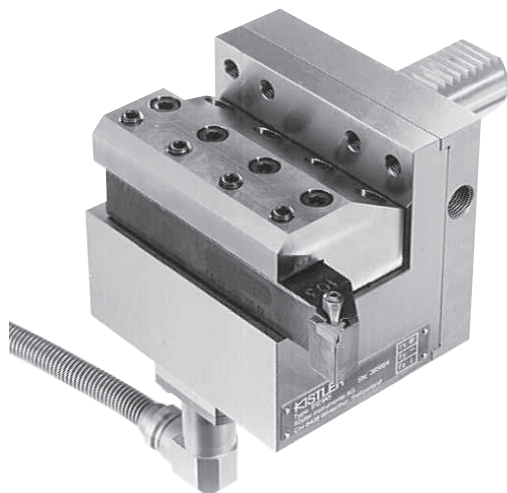
Das Dynamometer wird eingesetzt zum Messen von Schnittkräften an Drehmaschinen mit Werkzeugrevolver.

Dynamomètre à quartz à trois composantes pour mesurer les trois composantes orthogonales d'une force.

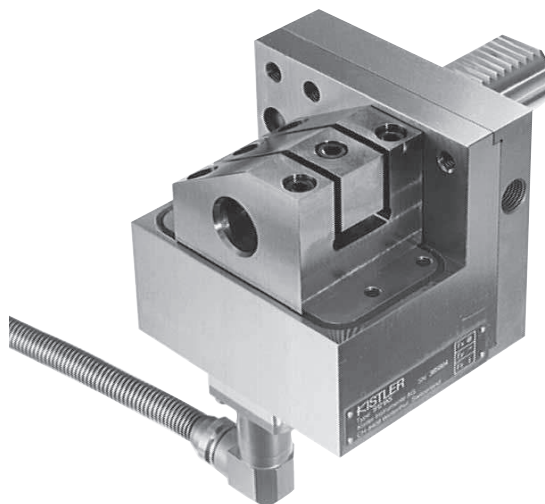
Le dynamomètre est utilisé pour mesurer les efforts de coupe sur des tours avec tourelle revolver.

Quartz three-component dynamometer for measuring the three orthogonal components of a force.

The dynamometer is used to measure cutting forces on turning machines with tool turret.



Type 9121 + 9153A20 + 9155A30 + 1689B5



Type 9121 + 9151A20 + 9155A30 + 1689B5

**Technische Daten**

**Données techniques**

**Technical Data\***

<b>Bereich</b> innerhalb Kraftangriffsbereich I (Aussendrehen)	<b>Gamme</b> dans la gamme d'appl. de la force I (pour tourner l'extérieur)	<b>Range</b> within force application range I (for turning the outside diameter)	$F_x, F_y$ $F_z$	kN kN	-3 ... 3 -6 ... 6
<b>Bereich</b> innerhalb Kraftangriffsbereich II (Innendrehen)	<b>Gamme</b> dans la gamme d'appl. de la force II (pour tourner l'intérieur)	<b>Range</b> within force application range II (for turning the inside diameter)	$F_x, F_y$ $F_z$	kN kN	-2 ... 2 -4 ... 4
<b>Kalibrierter Teilbereich</b>	<b>Gamme partielle étalonnée</b>	<b>Calibrated partial range</b>	$F_x, F_y$ $F_z$	N N	0 ... 300 0 ... 600
<b>Überlast</b>	<b>Surcharge</b>	<b>Overload</b>		%	20
<b>Ansprechschwelle</b>	<b>Seuil de réponse</b>	<b>Threshold</b>		N	<0,01
<b>Empfindlichkeit (nominal)</b>	<b>Sensibilité (nominale)</b>	<b>Sensitivity (nominal)</b>	$F_x, F_y$ $F_z$	pC/N pC/N	≈ -7,9 ≈ -3,8
<b>Empfindlichkeits-Änderung</b> innerhalb Kraftangriffsbereich	<b>Variation de la sensibilité</b> dans la gamme d'appl. de la force	<b>Sensitivity change</b> within force application range		%	≤3
<b>Linearität, alle Bereiche</b>	<b>Linéarité, toutes le gammes</b>	<b>Linearity, all ranges</b>		% FSO	≤±1
<b>Hysteres, alle Bereiche</b>	<b>Hystérésis, toutes le gammes</b>	<b>Hysteresis, all ranges</b>		% FSO	≤0,5
<b>Übersprechen, alle Achsen</b>	<b>Cross talk, toutes les axes</b>	<b>Cross talk, all axes</b>		%	≤±3
<b>Eigenfrequenz</b> aufgespannt im Klemmsystem, mit Werkzeughalter	<b>Fréquence propre</b> serré, avec porte-outil	<b>Natural frequency</b> clamped, with toolholder	$f_0 (x, y, z)$	Hz	≈1000
<b>Steifheit</b>	<b>Rigidité</b>	<b>Rigidity</b>	$C_x, C_y, C_z$	N/μm	≈600
<b>Betriebstemperaturbereich</b>	<b>Gamme de température d'utilisation</b>	<b>Operating temperature range</b>		°C	0 ... 70
<b>Kapazität (pro Kanal)</b>	<b>Capacité (de canal)</b>	<b>Capacitance (of channel)</b>		pF	≈170
<b>Isolationswiderstand, bei 20 °C</b>	<b>Résistance d'isolement, à 20 °C</b>	<b>Isolation resistance, at 20 °C</b>		Ω	>10 <sup>13</sup>
<b>Masseisolation</b>	<b>Isolé à la masse</b>	<b>Ground isolation</b>		Ω	>10 <sup>8</sup>
<b>Schutzart</b>	<b>Classe de protection</b>	<b>Protection class</b>			IP67
<b>Gewicht</b> (9121 + 9153A20 + 9155A30)	<b>Poids</b> (9121 + 9153A20 + 9155A30)	<b>Weight</b> (9121 + 9153A20 + 9155A30)		kg	5,0

1 N (Newton) = 1 kg · m · s<sup>-2</sup> = 0,1019... kp = 0,2248... lbf; 1 kgf = 9,80665 N; 1 inch = 25,4 mm; 1 g = 0,03527... oz

\* In all Kistler documents, the decimal sign is a comma on the line (ISO 31-0:1992).

## Beschreibung

Das Dynamometer besteht aus 3 Teilen und kann für Schnittkraftmessungen nur eingesetzt werden, wenn alle 3 Teile und das Anschlusskabel Typ 1689B5 montiert sind.

### Teil 1

Revolveradapter Typ 9155A..., angepasst auf Revolverwerkzeug-Klemmsystem, DIN 69880 (VDI 3425) mit integriertem Kühlschmiermittelanschluss.

### Teil 2

Dynamometer Typ 9121 mit eingebauten Quarzsensoren.

### Teil 3

Werkzeughalter für Aussendrehwerkzeuge  
oder  
Werkzeughalter für Bohrstangen

Typ 9153A...

Typ 9151A...

## Description

Le dynamomètre consiste en 3 parties. Il peut être utilisé pour la mesure des efforts de coupe seulement si les 3 parties et le câble de connexion type 1689B5 sont montés.

### 1re partie

Adaptateur revolver type 9155A..., ajusté au système de serrage pour outil-revolver, DIN 69880 (VDI 3425) avec connexion pour agent réfrigérant intégré.

### 2e partie

Dynamomètre type 9121 avec capteurs en cristal de quartz montés.

### 3e partie

Porte-outils pour outils pour tourner l'extérieur  
ou  
Porte-outils pour barres d'alésage

type 9153A...

type 9151A...

## Description

The dynamometer consists of 3 parts. It can only be used for cutting force measurements if the three parts and the connecting cable Type 1689B5 are mounted.

### Part 1

Revolver adapter Type 9155A..., developed for the revolver tool clamping system, DIN 69880 (VDI 3425) with integrated cooling agent connection.

### Part 2

Dynamometer Type 9121 with mounted quartz sensors.

### Part 3

Toolholders for tools turning the outside diameter  
or  
Toolholders for boring bars

Type 9153A...

Type 9151A...

Das Dynamometer Typ 9121 besteht aus vier Dreikomponenten-Kraftsensoren, die unter hoher Vorspannung zwischen einer Grundplatte und einer Deckplatte eingebaut sind.

Die Kraftsensoren enthalten je drei Quarzkristall-Plattenpaare, wovon das eine auf Druck in der z-Richtung und die beiden anderen auf Schub in der x- bzw. y-Richtung empfindlich sind. Die Kraftkomponenten werden praktisch weglos gemessen.

Die vier Sensoren sind masseisoliert eingebaut. Damit werden Erdschleifenprobleme weitgehend ausgeschaltet.

Das Dynamometer ist rostbeständig und gegen das Eindringen von Spritzwasser bzw. Kühlmittel geschützt. Zusammen mit dem Anschlusskabel Typ 1689B5 genügt das Dynamometer der Schutzklasse IP67.

Le dynamomètre type 9121 se compose de quatre capteurs de force à trois composantes montés sous précontrainte élevée entre une plaque de base et une plaque supérieure.

Les capteurs de force comprennent chacun trois paires de plaquettes en cristal de quartz: l'une de ces paires est sensible à la pression selon l'axe z alors que les deux autres sont sensibles au cisaillement selon l'axe x resp. y. Les composantes de la force sont mesurées pratiquement sans déformation.

Les quatre capteurs sont montés avec isolement par rapport à la masse. Ainsi les problèmes de circuits de retour par la terre sont largement éliminés.

Le dynamomètre est résistant à la rouille et protégé contre la pénétration de projections d'eau et d'agents réfrigérants. Ensemble avec le câble type 1689B5 il correspond à la classe de protection IP67.

The dynamometer Type 9121 consists of four three-component force sensors fitted under high preload between a base plate and a top plate.

Each sensor contains three pairs of quartz plates, one sensitive to pressure in the z direction and the other two responding to shear in the x and y direction respectively. The force components are measured practically without displacement.

The four sensors are mounted ground-isolated. Therefore ground loop problems are largely eliminated.

The dynamometer is rustproof and protected against penetration of splashwater and cooling agents. Together with the connecting cable Type 1689B5 it corresponds to the protection class IP67.

## Anwendung

- Schnittkraftmessungen an Drehmaschinen mit Werkzeugrevolver.  
Die hohe Empfindlichkeit und die niedrige Ansprechschwelle lassen in Verbindung mit den kalibrierten Teilbereichen auch exakte Messungen an kleinen Werkzeugen zu.
- Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung von Werkzeugüberwachungssystemen.

## Montage

Dynamometer, Revolveradapter, Werkzeughalter und Anschlusskabel sind als Einheit zusammenzubauen.

Die montierte Messeinrichtung wird dann mit dem vorhandenen Klemmsystem am Werkzeugrevolver fixiert.

## Elektronik

Eine Dreikomponenten-Kraftmessanlage benötigt neben dem Dynamometer noch drei Ladungsverstärker, welche die Ladungssignale des Dynamometers in Ausgangsspannungen umwandeln, die proportional zu den auftretenden Kräften sind.

## Applications

- Mesure des efforts de coupe sur tours avec tourelle revolver.  
La grande sensibilité et le seuil de réponse bas conjointement avec les gammes de mesure partielles étalonnées permettent aussi des mesures exactes sur de petits outils.
- Etalonnage du système de mesure dans la surveillance de l'outil.

## Montage

Le dynamomètre, l'adaptateur revolver, le porte-outil et le câble de connexion sont assemblés en une unité.

Le système de mesure monté est alors fixé au tourelle revolver à l'aide du système de serrage.

## Electronique

Outre le dynamomètre, une installation de mesure de force à trois composantes comprend encore trois amplificateurs de charge qui transforment les signaux de charge du dynamomètre en tensions de sortie proportionnelles aux forces appliquées.

## Applications

- Cutting force measurements on turning machines with tool turret.  
In conjunction with the calibrated partial ranges the high sensitivity and low threshold allow also precise measurements on small tools.
- Calibration of the force measuring device of tool monitoring systems.

## Mounting

Dynamometer, revolver adapter, toolholder and connecting cable are assembled as a unit.

The mounted measuring device is then fixed to the tool turret by means of the clamping system.

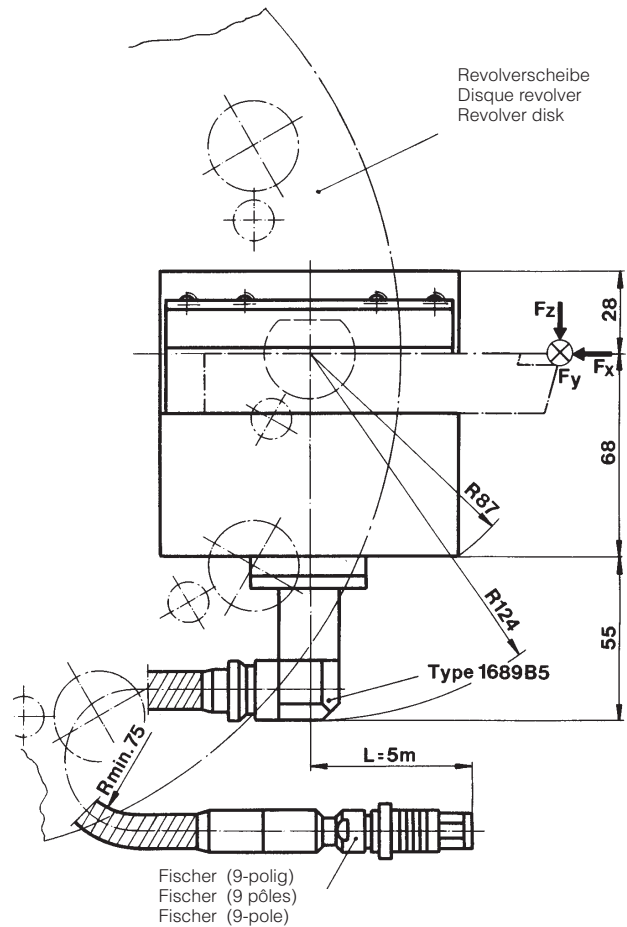
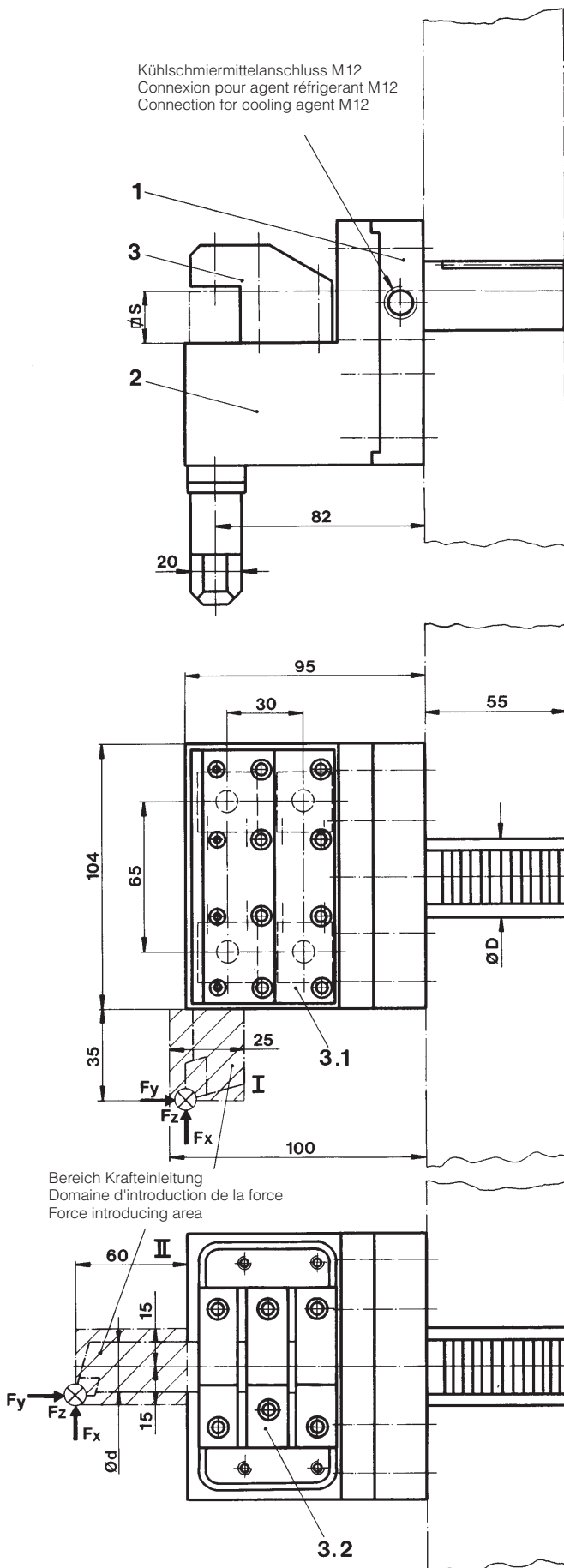
## Electronics

Besides the dynamometer, a three-component force measuring system also needs three charge amplifiers, which convert the dynamometer charge signals into output voltages proportional to the forces sustained.

## Abmessungen

## Dimensions

## Dimensions



**Aussendrehen**  
**Tourner l'extérieur**  
**Turning the outside diameter**

- 1** Revolveradapter, auswechselbar  
(siehe Zubehör)  
Adaptateur revolver, échangeable  
(voir accessoires)  
Revolver adapter, exchangeable  
(see accessories)

- 2** Dynamometer  
Dynamomètre  
Dynamometer

- 3** Werkzeughalter, auswechselbar  
(siehe Zubehör)  
Porte-outil, échangeable  
(voir accessoires)  
Toolholder, exchangeable  
(see accessories)

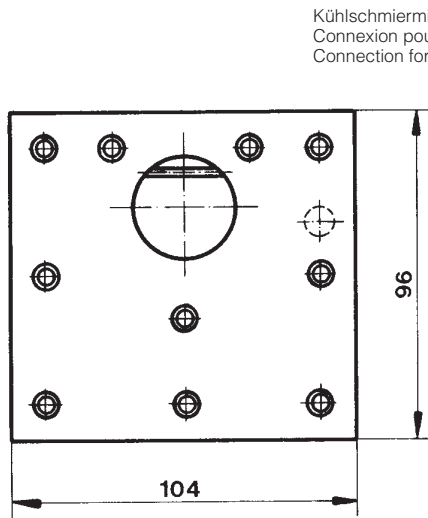
3.1 für Aussendrehwerkzeug  
pour outil p. tourner l'extérieur  
for tool turning the outside diam.

3.2 für Bohrstange  
pour barre d'alésage  
for boring bar

**Innendrehen**  
(Bohrstange)  
**Tourner l'intérieur**  
(barre d'alésage)  
**Turning the inside diameter**  
(boring bar)

## Zubehör

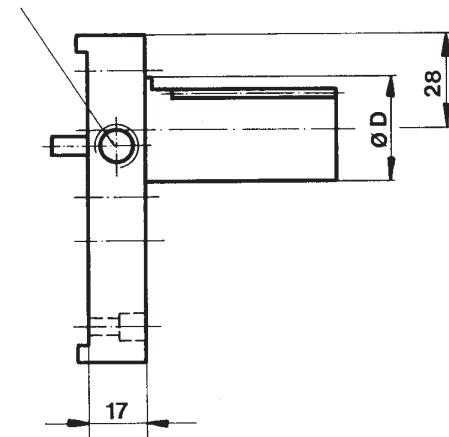
Revolveradapter Typ 9155A...  
(Klemmsystem DIN 69880; VDI 3425)



Kühlschmiermittelanschluss M12  
Connexion pour agent réfrigérant M12  
Connection for cooling agent M12

## Accessoires

Adaptateurs revolver type 9155A...  
(système de serrage DIN 69880; VDI 3425)



## Accessories

Revolver adapters Type 9155A...  
(clamping system DIN 69880; VDI 3425)

D = 30 mm      Type 9155A30  
D = 40 mm      Type 9155A40

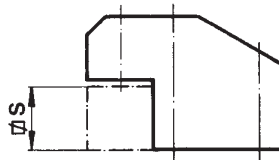
Lieferbare Typen: siehe Preisliste  
Types livrables: voir Prix-Courant  
Available types: see Price List

Revolveradapter für andere Klemmsysteme  
auf Anfrage.  
Adaptateurs revolver pour d'autres systèmes  
de serrage sur demande.  
Revolver adapters for other clamping systems  
on request.

Werkzeughalter Typ 9153A...  
für Aussendrehwerkzeuge



Porte-outils type 9153A...  
pour outils pour tourner l'extérieur

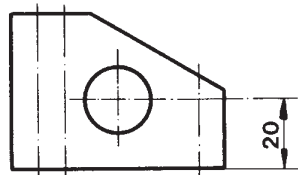


Toolholders Type 9153A...  
for tools turning the outside diameter

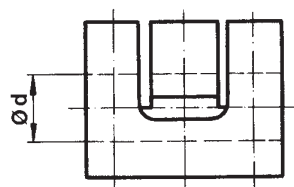
s = 20 x 20 mm      Type 9153A20

Lieferbare Typen: siehe Preisliste  
Types livrables: voir Prix-Courant  
Available types: see Price List

Werkzeughalter Typ 9151A...  
für Bohrstangen



Porte-outils type 9151A...  
pour barres d'alésage



Toolholders Type 9151A...  
for boring bars

d = 20 mm      Type 9151A20

Lieferbare Typen: siehe Preisliste  
Types livrables: voir Prix-Courant  
Available types: see Price List

## Für 3-Komponenten-Schnittkraft- messung $F_x$ , $F_y$ , $F_z$

- Anschlusskabel (3adrig)      Typ 1689B5
- Verlängerungskabel (3adrig)      Typ 1688B5
- Verteilkästchen      Typ 5407A

Lieferumfang: siehe Preisliste.

## Pour mesurer des efforts de coupe à 3 composantes $F_x$ , $F_y$ , $F_z$

- Câble de connexion (3 fils)      type 1689B5
- Câble de rallonge (3 fils)      type 1688B5
- Boîtier de distribution      type 5407A

Etendu de la fourniture: voir Prix-Courant.

## For 3-Component Cutting Force Measurements $F_x$ , $F_y$ , $F_z$

- Connecting cable (3 leads)      Type 1689B5
- Extension cable (3 leads)      Type 1688B5
- Distribution box      Type 5407A

Scope of delivery: see Price List.

## Schnittkraft- Messanlagen

Weitere Einzelheiten  
siehe Datenblatt IN6.9121.

## Systèmes pour mesurer les efforts de coupe

D'autres informations  
voir notice technique IN6.9121.

## Systems for cutting force measurements

Further information  
see Data sheet IN6.9121.







# ANEXO V

---

## PROTOCOLO DE ENSAYO

*Metodología para la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras de  
uso aeronáutico a través del análisis de la viruta*

---









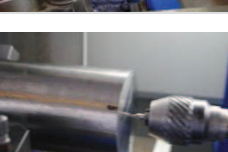
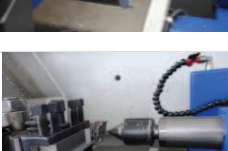

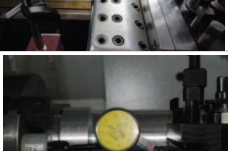
## Índice

<b>A.V. Protocolo de ensayo .....</b>	<b>A.V.1</b>
---------------------------------------	--------------



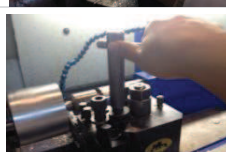





A.V. Protocolo de ensayo



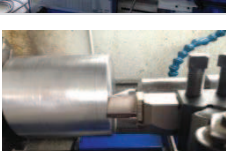
HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Encendido de torno	NA	NA	NA	NA	NA	Visual
	Sujeción y ajuste de plato de garras según diámetro de pieza y desplazamiento longitudinal	NA	NA	NA	NA	Hta para juste de torno	Ajuste de palanca de amarre
	Comprobación de oscilación de la pieza	NA	NA	NA	60	Mazo y carboncillo	Ajuste de pieza
	Ajuste de hta de refrentado (Portaherramienta en torreta)	NA	2	0,1	220	Llave para tuerca de sujeción del carro móvil	Inserto triangular con porta neutro
	Ajuste de altura de hta	NA	NA	NA	NA	Ajuste mediante indicador de caratula	Visual
	Realizar refrentar la cara frontal de la pieza	2 pasada desbate 1 pasada de acabado	2 desbate 1 acabado	0,1	220	Ajuste mediante indicador de caratula	Inserto triangular con porta neutro
	1. Realizar agujero para el contra punto 2. Quitar hta de broca centradora y colocar contrapunto	Según criterio	Manual	Manual	60	Broca centradora	Ajustar palanca de amarre
		NA	NA	NA	NA	Contrapunto	Ajustar palanca de amarre
	Calibrar htas (altura , paralelismo con respecto al centro)	NA	NA	NA	NA	NA	Ajuste mediante indicador de caratula
		NA	NA	NA	NA	NA	Ajuste mediante indicador de caratula
		NA	NA	NA	NA	NA	Ajuste mediante indicador de caratula

# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Modificar cotas y parámetros de corte	NA	NA	NA	NA	NA	Según lo necesario en diámetro y longitud
	Comprobar dimensión de $\varnothing$ 105 a 100 mm	NA	NA	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Colocar hta de desbaste (Portaherramienta en torreta)	NA	NA	NA	NA	Llave para tuerca de sujeción del carro móvil	Manual
	Cilindrar 65 mm de longitud	2 pasada desbaste 1 pasada de acabado	2 desbaste 1 acabado	0,1	220	Inserto triangular con porta neutro	Manual
	Comprobar dimensión a $\varnothing$ 100 x 65 mm	NA	NA	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Cambio de hta	NA	NA	NA	NA	Llave para tuerca de sujeción del carro móvil	Manual

## ENSAYO DEL BLOQUE 1 CORONA 1




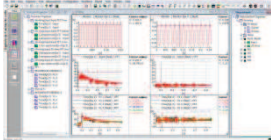
<b>B1C1V30</b>	Selección de ensayo según dimensión (Bloque 1 Corona 1) $\varnothing$ 100 x 10 mm	NA	10	Variado	92	NA	$\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 98 mm
	Colocar herramienta de ranurado	NA	NA	NA	NA	Hta de Ranurado	Manual
	Modificar cotas y parámetros de corte	1	10	0,1	220	Hta de Ranurado	Manual
	Realizar ranurado de corona $\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 99 mm	1	10	0,1	220	Hta de Ranurado	Ancho de corona 1 mm

# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Comprobar dimensión (Espacio de 3mm)	NA	NA	NA	NA	Calibre pie de rey	$\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 98 mm
	Cambio de hta	NA	NA	NA	NA	Llave para tuerca de sujeción del carro móvil	Manual
	Cambio de herramienta de fresado frontal (desahogo)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Calibrar htas (altura, paralelismo con respecto al centro)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Ajuste de cotas desahogo a $\theta$ 45° (colocar hoja milimétrica para long de arco)	NA	NA	NA	NA	Hoja milimétrica	Visual
	Fresado de desahogo (Entradas- Salida)	NA	NA	NA	NA	Amoladora manual y Fresa $\varnothing 6$ mm	Manual
	Cambio de hts de fresado	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Cambio de hta de ensayo	NA	NA	NA	NA	Llave para tuerca de sujeción del carro móvil	Inserto triangular con porta neutro
	Confirmar parámetros de corte	NA	10	Variado	92	Inserto triangular con porta neutro	Visual
	Colocar cajas para recogida de viruta	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta	Manual
	Ajuste de programa PULSE para la captura de datos	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables, software	Visual




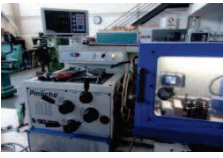
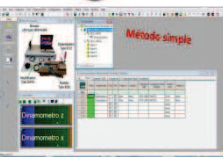
# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$p$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Verificar el nombre del programa con la programación de ensayo	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	Visual
	Encendido de equipamiento de filmación y captura de fuerzas	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	Visual
<b>B1C1V30</b>	Identificación visual de ensayo	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	Visual
	Realizar ensayo (Bloque 1 Corona 1) B1C1V30	NA	10	Variado	92	Inserto triangular con porta neutro	Según protocolo
<b>B1C1V30</b>	Ensayos según protocolo	NA	1	0,05		Inserto 1 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	1,5	0,1		Inserto 1 triangular con porta neutro ( 2 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	3	0,2		Inserto 1 triangular con porta neutro ( 3 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA		Inserto 2 triangular con porta neutro	Seleccionar inserto de almacenaje de herramienta indicada en código ensayo




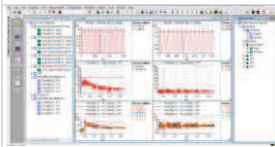
# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$p$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
<b>B1C1V30</b>	Ensayos según protocolo	NA	NA	NA	92	Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	4,5	0,3		Inserto 2 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	10 ensayos
	Apagado de equipamiento de filmación	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	Visual
	Recogida de viruta e identificación con código del ensayo y hta de corte	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta ( una bolsa por cada tipo de ensayo)	Visual
	Cambio de hta de ensayo	NA	NA	NA	NA	Inserto 2 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	Manual
<b>ENSAYO DEL BLOQUE 1 CORONA 2</b>							
<b>B1C2V65</b>	Selección de ensayo según dimensión (Bloque 1 Corona 2) B1C2V 65 $\varnothing$ 92 x 10 mm	NA	10	Variado	220	NA	$\varnothing_e$ 92 - $\varnothing_i$ 90 mm
	Comprobar dimensión de $\varnothing$ 92 mm	NA	NA	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Ajuste de cotas y parámetros	NA	10	Variado	220	Hta de Ranurado	$\varnothing_e$ 92 - $\varnothing_i$ 90 mm
	Colocar herramienta de ranurado	NA	NA	NA	NA	Hta de Ranurado	Manual
	Realizar ranurado de corona $\varnothing_e$ 92 - $\varnothing_i$ 90 mm	1	10	0,1	220	Hta de Ranurado	Ancho de corona 1 mm



# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$p$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Comprobar dimensión (Espacio de 3mm)	NA	NA	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Cambio de hta	NA	NA	NA	NA	Llave para tuerca de sujeción del carro móvil	Manual
	Cambio de herramienta de fresado frontal (desahogo)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Ajuste de cotas desahogo a $\theta 80^\circ$ (colocar hoja milimétrica para long de arco)	NA	NA	NA	NA	Hoja milimétrica	Visual
	Fresado de desahogo (Entradas- Salida)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Cambio de hts de fresado	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Cambio de hta de ensayo	NA	NA	NA	NA	Inserto triangular con porta neutro	Manual
	Confirmar parámetros de corte	NA	10	Variado	220	Inserto triangular con porta neutro	Manual
	Colocar cajas para recogida de viruta	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta	Manual
	Ajuste de programa PULSE para la captura de datos	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	Visual
	Verificar el nombre del programa con la programación de ensayo	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	Visual





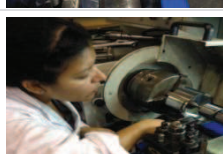
# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Encendido de equipamiento de filmación y captura de fuerzas	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	Visual
<b>B1C2V65</b>	Identificación Visual de	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	
	Realizar ensayo (Bloque 1 Corona 2) B1C2V65	NA	10	Variado	220	Inserto 2 triangular con porta neutro	Según protocolo
<b>B1C2V65</b>	Ensayos según protocolo	NA	1	0,05		Inserto 2 triangular con porta neutro ( 2 de 3)	20 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	1,5	0,1		Inserto 2 triangular con porta neutro ( 3 de 3)	10 ensayos
	Cambio de filo de inserto de corte	NA	NA	NA		Inserto 3 triangular con porta neutro	Seleccionar inserto de almacenaje de herramienta indicada en código ensayo
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
	Ensayos según protocolo	NA	3	0,2		Inserto 3 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual


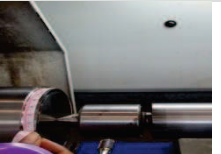

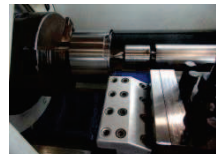


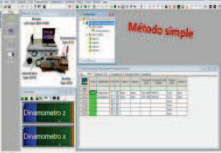


# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
<b>B1C2V65</b>	Ensayos según protocolo	NA	4,5	0,3	220	Inserto 3 triangular con porta neutro ( 2 de 3)	10 ensayos
	Recogida de viruta e identificación con código del ensayo y hta de corte	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta (CADA CORTE)	Visual
	Apagado de equipamiento de filmación	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	
	Cambio de hta de ensayo	NA	NA	NA	NA	Inserto 3 triangular con porta neutro	Manual

## ENSAYO DEL BLOQUE 2 CORONA 1

<b>B2C1V80</b>	Selección de ensayo según dimensión (Bloque 2 Corona 1) B2C1V 80 $\varnothing$ 100 x 10 mm	NA	10	Variado	265	NA	$\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 98 mm
	Comprobar dimensión de $\varnothing$ 100mm	NA	NA	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Colocar herramienta de ranurado	NA	NA	NA	NA	Hta de Ranurado	Manual
	Ajuste de cotas y parámetros	NA	10	Variado	265	NA	$\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 98 mm
	Realizar ranurado de corona $\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 98 mm	1	10	0,1	220	Hta de Ranurado	Ancho de corona 1 mm
	Comprobar dimensión (Espacio de 3mm)	NA	10	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual

# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$p$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Cambio de hts de ranurado	NA	NA	NA	NA	Hta de Ranurado	Manual
	Cambio de herramienta de fresado frontal (desahogo)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	
	Ajuste de cotas desahogo a $\theta$ 60° (colocar hoja milimétrica para long de arco)	NA	NA	NA	NA	Hoja milimétrica	Visual
	Fresado de desahogo (Entradas- Salida)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Cambio de hts de fresado	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	
	Cambio de hta de ensayo (Nueva)	NA	NA	NA	NA	Inserto triangular con porta neutro	
	Confirmar parámetros de corte	NA	10	Variado	265	Inserto triangular con porta neutro	
	Colocar cajas para recogida de viruta	NA	NA	NA	NA	Seleccionar la caja de almacenaje de herramienta indicada en código ensayo y bolsas para recogida de viruta	
	Ajuste de programa PULSE para la captura de datos	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	Visual
	Verificar el nombre del programa con la programación de ensayo	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	
	Encendido de equipamiento de filmación y captura de fuerzas	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	



## HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
<b>B2C1V80</b>	Identificación Visual	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	Visual
	Realizar ensayo (Bloque 2 Corona 1) B2C1V 80	NA	10	Variado	265	Inserto 3 triangular con porta neutro	
<b>B2C1V80</b>	Ensayos según protocolo	NA	1	0,05		Inserto 3 triangular con porta neutro ( 3 de 3)	20 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
	Cambio de filo de inserto de corte	NA	NA	NA		Inserto 4 triangular con porta neutro	Seleccionar inserto de almacenaje de herramienta indicada en código ensayo
		NA	1,5	0,1		Inserto 4 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	3	0,2		Inserto 4 triangular con porta neutro ( 2 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	4,5	0,3		Inserto 4 triangular con porta neutro ( 3 de 3)	10 ensayos
	Apagado de equipamiento de filmación	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	Visual





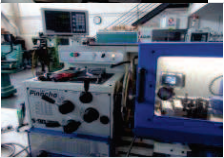

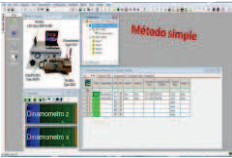



# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$p$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Recogida de viruta e identificación con código del ensayo y hta de corte	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta ( una bolsa por cada corte)	Visual
	Cambio de hta de ensayo (Nueva)	NA	NA	NA	NA	Inserto 4 triangular con porta neutro	Manual

## ENSAYO DEL BLOQUE 2 CORONA 2

<b>B2C2V125</b>	Selección de ensayo según dimensión (Bloque 2 Corona 2) B2C2V 125 $\varnothing$ 92 x 10 mm	NA	10	Variado	430	NA	$\varnothing_e$ 92 - $\varnothing_i$ 90 mm
	Comprobar dimensión de $\varnothing$ 92 mm	NA	NA	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Colocar herramienta de ranurado	NA	NA	NA	NA	Hta de Ranurado	$\varnothing_e$ 92 - $\varnothing_i$ 90 mm
	Ajuste de cotas y parámetros	1	10	0,1	220	Hta de Ranurado	Manual
	Realizar ranurado de corona $\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 98 mm	1	10	0,1	220	Hta de Ranurado	Ancho de corona 1 mm
	Comprobar dimensión (Espacio de 3mm)	NA	10	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Cambio de herramienta de fresado frontal (desahogo)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Ajuste de cotas desahogo a $\theta$ 110° (colocar hoja milimétrica para long de arco)	NA	NA	NA	NA	Hoja milimétrica	Visual

# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Fresado de desahogo (Entradas-Salida)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Cambio de hts de fresado	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	
	Cambio de hta de ensayo (Nueva)	NA	NA	NA	NA	Inserto 5 triangular con porta neutro	
	Confirmar parámetros de corte	NA	10	Variado	430	Inserto 5 triangular con porta neutro	Visual
	Colocar cajas para recogida de viruta	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta	
	Ajuste de programa PULSE para la captura de datos	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	
	Verificar el nombre del programa con la programación de ensayo	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	
<b>B2C2V125</b>	Identificación Visual	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	
	Encendido de equipamiento de filmación y captura de fuerzas	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	Manual
	Realizar ensayo (Bloque 2 Corona 2) B2C2V 125	NA	10	Variado	430	Inserto 5 triangular con porta neutro	



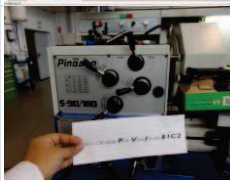

# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$p$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
<b>B2C2V125</b>	Ensayos según protocolo	NA	1	0,05	430	Inserto 5 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	20 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
	Ensayos según protocolo	NA	1,5	0,1		Inserto 5 triangular con porta neutro ( 2 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	3	0,2		Inserto 5 triangular con porta neutro ( 3 de 3)	10 ensayos
	Cambio de filo de inserto de corte	NA	NA	NA		Inserto 6 triangular con porta neutro	Seleccionar inserto de almacenaje de herramienta indicada en código ensayo
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Manual
	Ensayos según protocolo	NA	4,5	0,3		Inserto 6 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta ( una bolsa por cada corte)	Visual
	Apagado de equipamiento de filmación	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	
	Cambio de hta de ensayo	NA	NA	NA	NA	Inserto 6 triangular con porta neutro	Seleccionar la caja de almacenaje de herramienta indicada en código ensayo

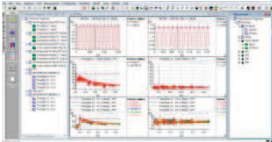



# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
ENSAYO DEL BLOQUE 3 CORONA 1							
<b>B3C1V45</b>	Selección de ensayo según dimensión (Bloque 3 Corona 1) B3C1V 45 $\varnothing$ 100 x 10 mm	NA	10	Variado	140	NA	$\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 98 mm
	Comprobar dimensión de $\varnothing$ 100 mm	NA	NA	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Cambiar herramienta de ranurado	NA	NA	NA	NA	Hta de Ranurado	Manual
	Ajuste de cotas y parámetros	1	10	0,1	220	Hta de Ranurado	
	Realizar ranurado de corona $\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 98 mm	NA	10	1	NA	Hta de Ranurado	$p=10$ mm , $\varnothing_e$ 100 - $\varnothing_i$ 98 mm
	Comprobar dimensión (Espacio de 3mm)	NA	10	3	NA	Calibre pie de rey	Ancho de corona 1 mm
	Cambio de herramienta de fresado frontal (desahogo)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Ajuste de cotas desahogo a $\theta$ 65° (colocar hoja milimétrica para long de arco)	NA	NA	NA	NA	Hoja milimétrica	Visual
	Fresado de desahogo (Entradas- Salida)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Cambio de hts de fresado	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	

# HOJA DE PROCESO











PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Cambio de hta de ensayo (Nueva)	NA	NA	NA	NA	Inserto triangular con porta neutro	Manual
	Confirmar parámetros de corte	NA	10	Variado	140	Inserto triangular con porta neutro	
	Colocar cajas para recogida de viruta	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta	
	Ajuste de programa PULSE para la captura de datos	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	Visual
	Verificar el nombre del programa con la programación de ensayo	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	
<b>B3C1V45</b>	Identificación Visual	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	
	Encendido de equipamiento de filmación y captura de fuerzas	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	
	Realizar ensayo (Bloque 3 Corona 1) B3C1V 45	NA	10	Variado	140	Inserto triangular con porta neutro	Manual
<b>B3C1V45</b>	Ensayos según protocolo	NA	1	0,05			
		NA	NA	NA		Inserto 6 triangular con porta neutro	Visual

# HOJA DE PROCESO

HOJA DE PROCESO							
PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$p$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
<b>B3C1V45</b>	Ensayos según protocolo	NA	1,5	0,1	140	Inserto 6 triangular con porta neutro ( 2 de 3)	20 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	3	0,2		Inserto 6 triangular con porta neutro ( 3 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
	Cambio de filo de inserto de corte	NA	NA	NA		Inserto 7 triangular con porta neutro	Seleccionar inserto de almacenaje de herramienta indicada en código ensayo
	Ensayos según protocolo	NA	4,5	0,3		Inserto 7 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	10 ensayos
	Recogida de viruta e identificación con código del ensayo y hta de corte	NA	NA	NA	NA	Cambio de programa según protocolo	Visual
	Apagado de equipamiento de filmación	NA	NA	NA	NA	Inserto 7 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	
	Cambio de hta de ensayo	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta ( una bolsa por cada corte)	Manual
ENSAYO DEL BLOQUE 3 CORONA 2							
<b>B3C2V100</b>	Selección de ensayo según dimensión (Bloque 3 Corona 2) B3C2V 100 $\varnothing$ 92 x 10 mm	NA	10	1	92	NA	$p = 10 \text{ mm}$ , $\varnothing_e 92 - \varnothing_i 90 \text{ mm}$



# HOJA DE PROCESO

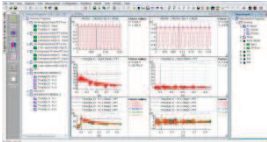



PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Comprobar dimensión de $\varnothing$ 92 mm	NA	NA	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Colocar herramienta de ranurado	NA	NA	NA	NA	Hta de Ranurado	Manual
	Ajuste de cotas y parámetros	NA	10	Variado	220	NA	$\varnothing_e$ 92 - $\varnothing_i$ 90 mm
	Realizar ranurado de corona $\varnothing_e$ 92- $\varnothing_i$ 90mm	1	10	0,1	220	Hta de Ranurado	Ancho de corona 1 mm
	Comprobar dimensión (Espacio de 3mm)	NA	10	NA	NA	Calibre pie de rey	Visual
	Cambiar herramienta de fresado frontal (desahogo)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Ajuste de cotas desahogo a $\theta$ 45° (colocar hoja milimétrica para long de arco)	NA	NA	NA	NA	Hoja milimétrica	Visual
	Fresado de desahogo (Entradas- Salida)	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	Manual
	Cambio de hts de fresado	NA	NA	NA	NA	Amoladora Manual	
	Cambio de hta de ensayo (Nueva)	NA	NA	NA	NA	Inserto triangular con porta neutro	
	Confirmar parámetros de corte	NA	10	Variado	92	Inserto triangular con porta neutro	



# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$\rho$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
	Colocar cajas para recogida de viruta	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta	Manual
	Ajuste de programa PULSE para la captura de datos	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	Visual
	Verificar el nombre del programa con la programación de ensayo	NA	NA	NA	NA	Ordenador, Modulo, conexión de cables , software	
<b>B3C2V100</b>	Identificación de ensayo	NA	NA	NA	NA	NA	Visual
	Encendido de equipamiento de filmación y captura de fuerzas	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	
	Realizar ensayo (Bloque 3 Corona 2) B3C2V25	NA	10	Variado	92	Inserto 7 triangular con porta neutro	Manual
<b>B3C2V100</b>	Ensayos según protocolo	NA	1	0,05		Inserto 7 triangular con porta neutro ( 2 de 3)	20 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
	Ensayos según protocolo	NA	1,5	0,1		Inserto 7 triangular con porta neutro ( 3 de 3)	10 ensayos
	Cambio de filo de inserto de corte	NA	NA	NA		Inserto 8 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	Seleccionar inserto de almacenaje de herramienta indicada en código ensayo

# HOJA DE PROCESO

PROTOCOLO		PUESTA A PUNTO				METODO DE VERIFICACIÓN	
FOTO	PROCEDIMIENTO	Pasadas		Avance	Velocidad	Tipo de herramienta	Verificación
		N	$p$ [mm]	$f$ [mm/r]	$V_c$ [rpm]		
<b>B3C2V100</b>		NA	NA	NA	92	Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	3	0,2		Inserto 8 triangular con porta neutro ( 1 de 3)	10 ensayos
		NA	NA	NA		Cambio de programa según protocolo	Visual
		NA	4,5	0,3		Inserto 8 triangular con porta neutro ( 2 de 3)	10 ensayos
	Recogida de viruta e identificación con código del ensayo y hta de corte	NA	NA	NA	NA	Bolsas para recogida de viruta ( una bolsa por cada corte)	Manual
	Apagado de equipamiento de filmación	NA	NA	NA	NA	Cámara digital	Visual
	Cambio de hta de ensayo	NA	NA	NA	NA	Inserto 8 triangular con porta neutro	Seleccionar la caja de almacenaje de herramienta indicada en código ensayo

## FIN DEL ESTUDIO



# ANEXO VI

---

## HOJA DE CÁLCULO DE LOS PARAMETROS DE ENTRADA



**Índice**

<b>Tabla A.VI. 1 Hoja de cálculo de los parámetros de entrada .....</b>	<b>A.VI.1</b>
---	---------------





Tabla A.VI. 1 Hoja de cálculo de los parámetros de entrada

Parámetros de trabajo			Velocidad de corte		Posición angular del torno en régimen cte $\varphi$ [rad] (desahogo)	Frecuencia [s <sup>-1</sup> o Hz]	Periodo calculado [s]	Tiempo de mecanizado [s] en 1 rev de corte
$n \left[ \frac{r}{\text{min}} \right]$	$\varnothing$ [mm]	$t_r^1$ [s]	<b>Tangencial</b> $V_c = \frac{n \times \pi \times D}{1000} \left[ \frac{m}{\text{min}} \right]$	<b>Angular</b> $W = n \frac{r}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{rad}}{1 r} \times \frac{1 \text{ min}}{60 s} = \left[ \frac{\text{rad}}{s} \right]$	$\varphi = t_r \frac{(W_f - W_i)}{2}$	$N = \frac{1}{T}$	$T = \frac{1}{n}$	$d\varphi = W dt$ $\int_{t_i}^{t_f} W dt = \int_{\varphi_i}^{\varphi_f} d\varphi$ $W(t_f - t_i) = \varphi_f - \varphi_i$ $t_m = \frac{\varphi_f - \varphi_i}{W}$
92	100	0.113	28.90	9.63	31° ∴ se ajusta a 45° ≈ 0.78 rad en $t_d$ 0.08 s	1.53	0.653	0.571
220	92	0.110	63.58	23.03	72.5° ∴ se ajusta a 80° ≈ 1.39 rad en $t_d$ 0.06 s	3.67	0.272	0.212
265	100	0.06	83.25	27.75	47.5° ∴ se ajusta a 60° ≈ 1.04 rad en $t_d$ 0.03 s	4.42	0.226	0.188
430	92	0.08	124.03	45.02	103° ∴ se ajusta a 115° ≈ 2.07 rad en $t_d$ 0.045 s	7.18	0.139	0.093
140	100	0.122	44	14.66	51° ∴ se ajusta a 65° ≈ 1.13 rad en $t_d$ 0.07 s	2.33	0.428	0.351
360	92	0.128	104	37.69	138° ∴ se ajusta a 150° ≈ 2.61 rad en $t_d$ 0.07 s	5.99	0.166	0.097

<sup>1</sup> $t_r$  es el tiempo que requiere el torno desde su arranque hasta llegar a régimen constante.



# ANEXO VII

---

## GRÁFICAS REPRESENTATIVAS DE FUERZAS DE CORTE

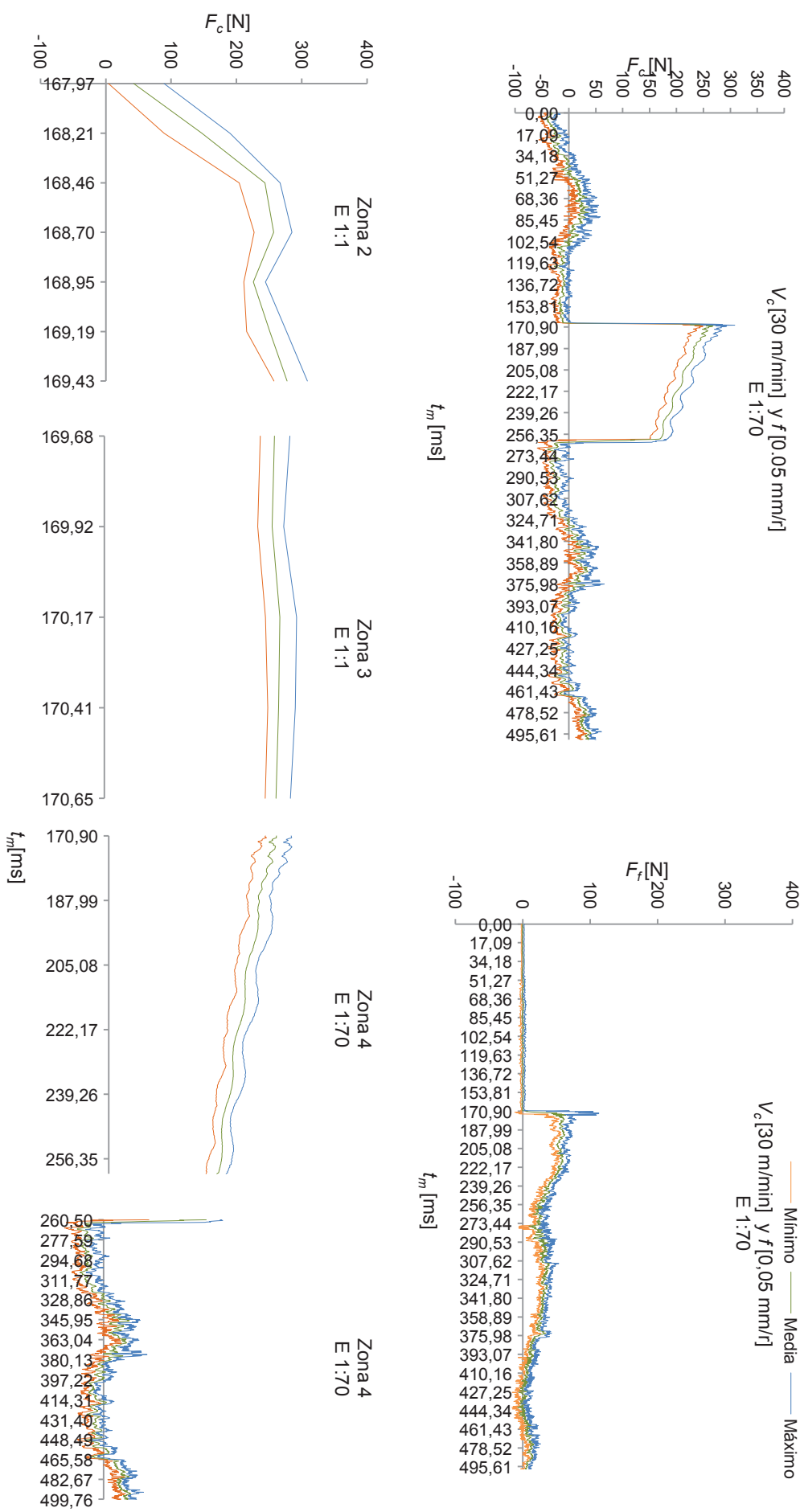


**Índice**

<b>A.VII.1</b>	<b>Gráficas representativas de las fuerzas de corte .....</b>	<b>A.VII.1</b>
----------------	---	----------------



**A.VII.1 Gráficas representativas de las fuerzas de corte**



**Figura A.VII.1** Evolución de  $F_c$  y  $F_t$  para  $V_c$  [30 m/min] y  $f$  [0,05 mm/r].



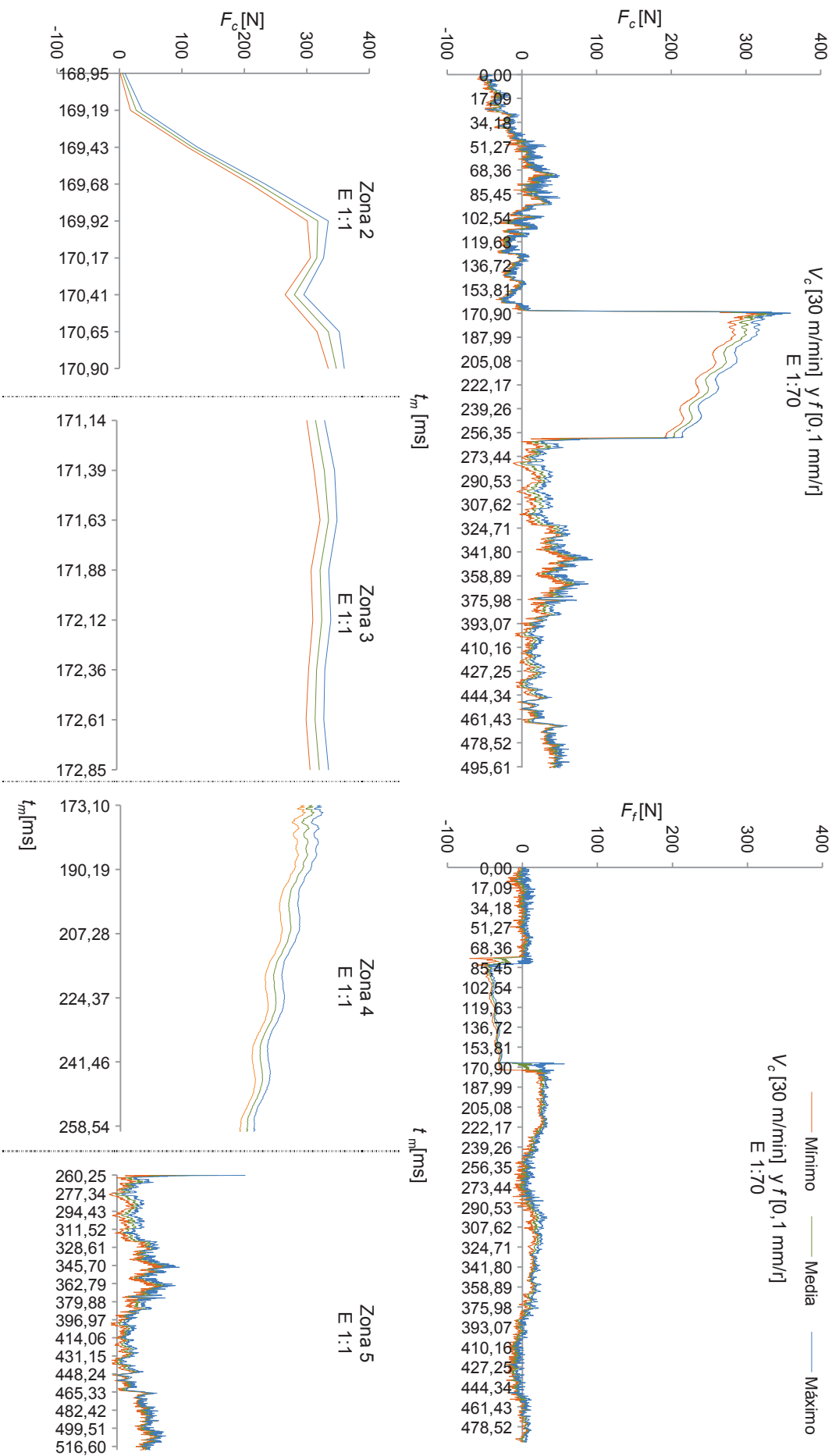
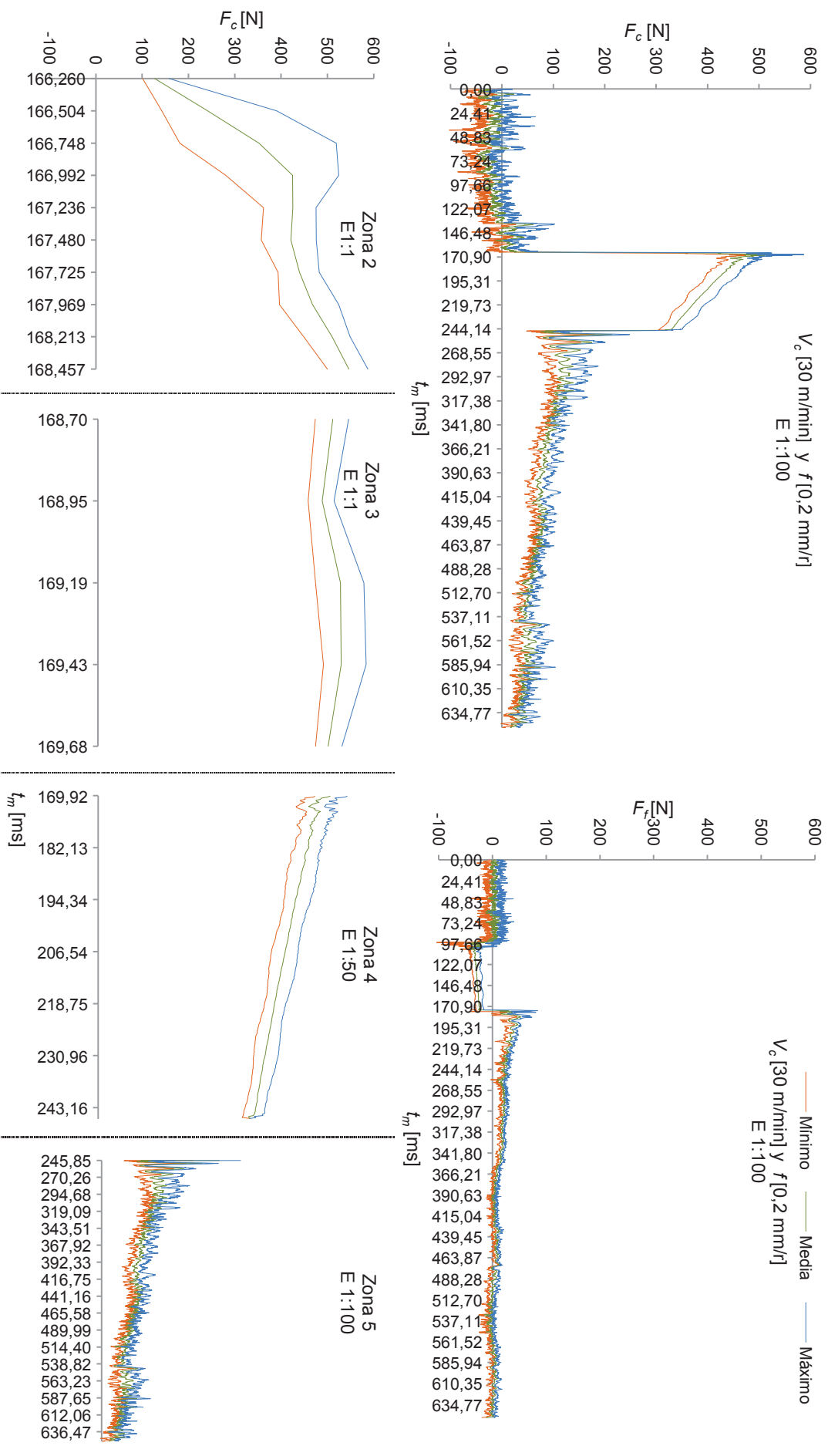


Figura A.VII.2 Evolución de  $F_c$  y  $F_r$  para  $V_c$  [30 m/min] y  $f$  [0.1 mm/r].



**Figura A.VII.3** Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [30 m/min] y  $f$  [0,2 mm/r].

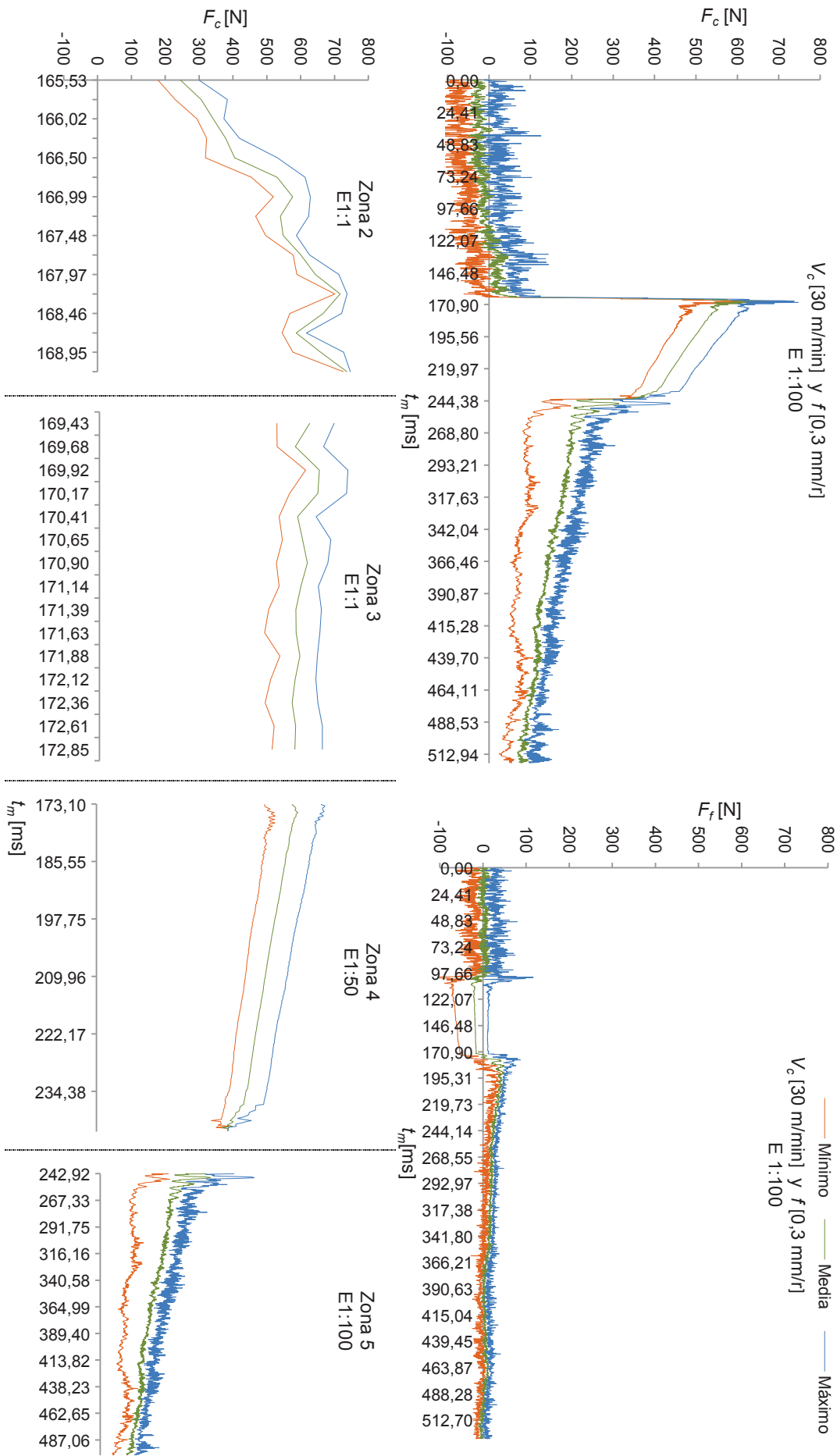


Figura A.VII.4 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [30 m/min] y  $f$  [0,3 mm/r].

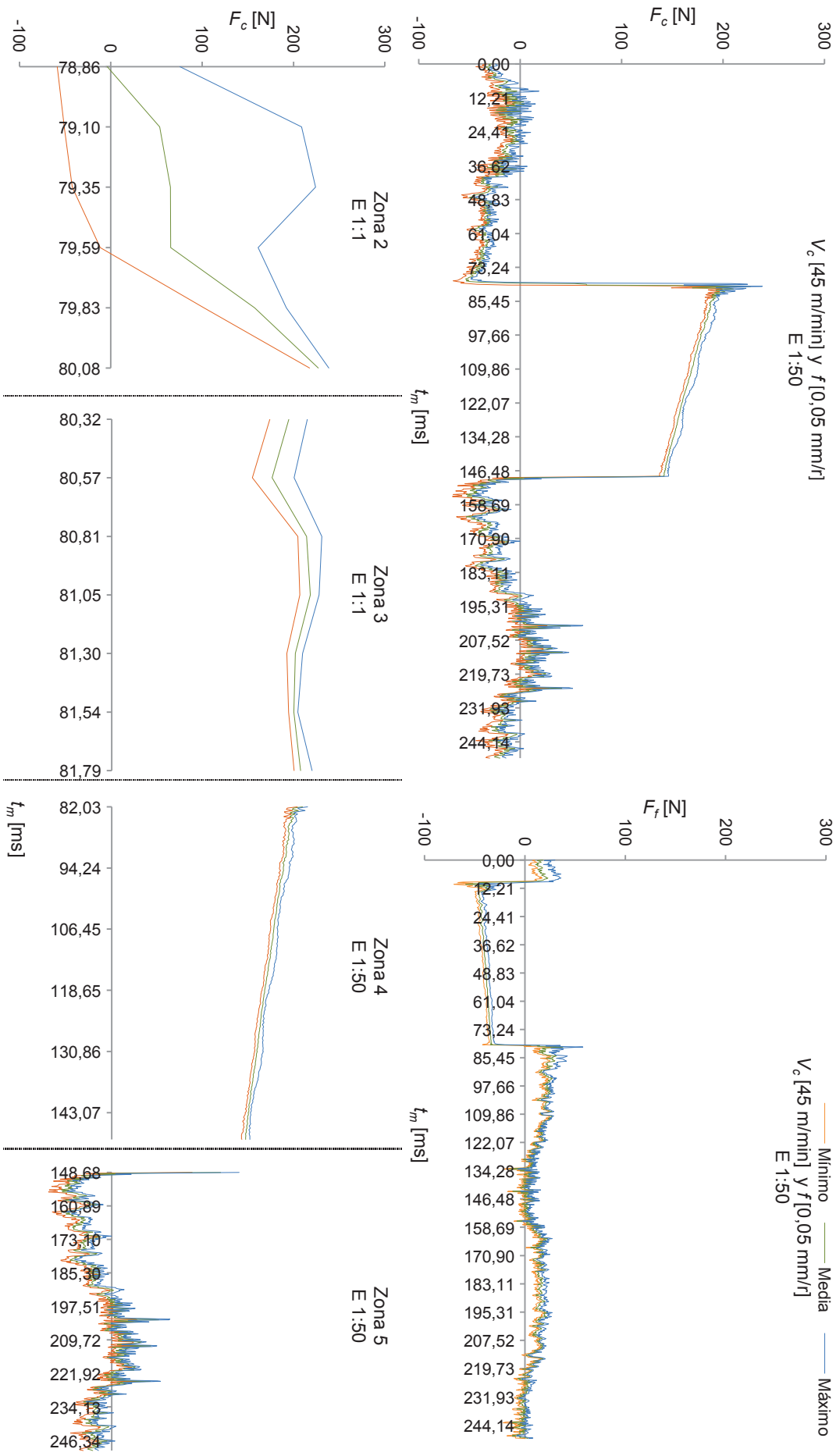


Figura A.VII.5 Evolución de  $F_c$  y  $F_t$  para  $V_c$  [45 m/min] y  $f$  [0,05 mm/r].

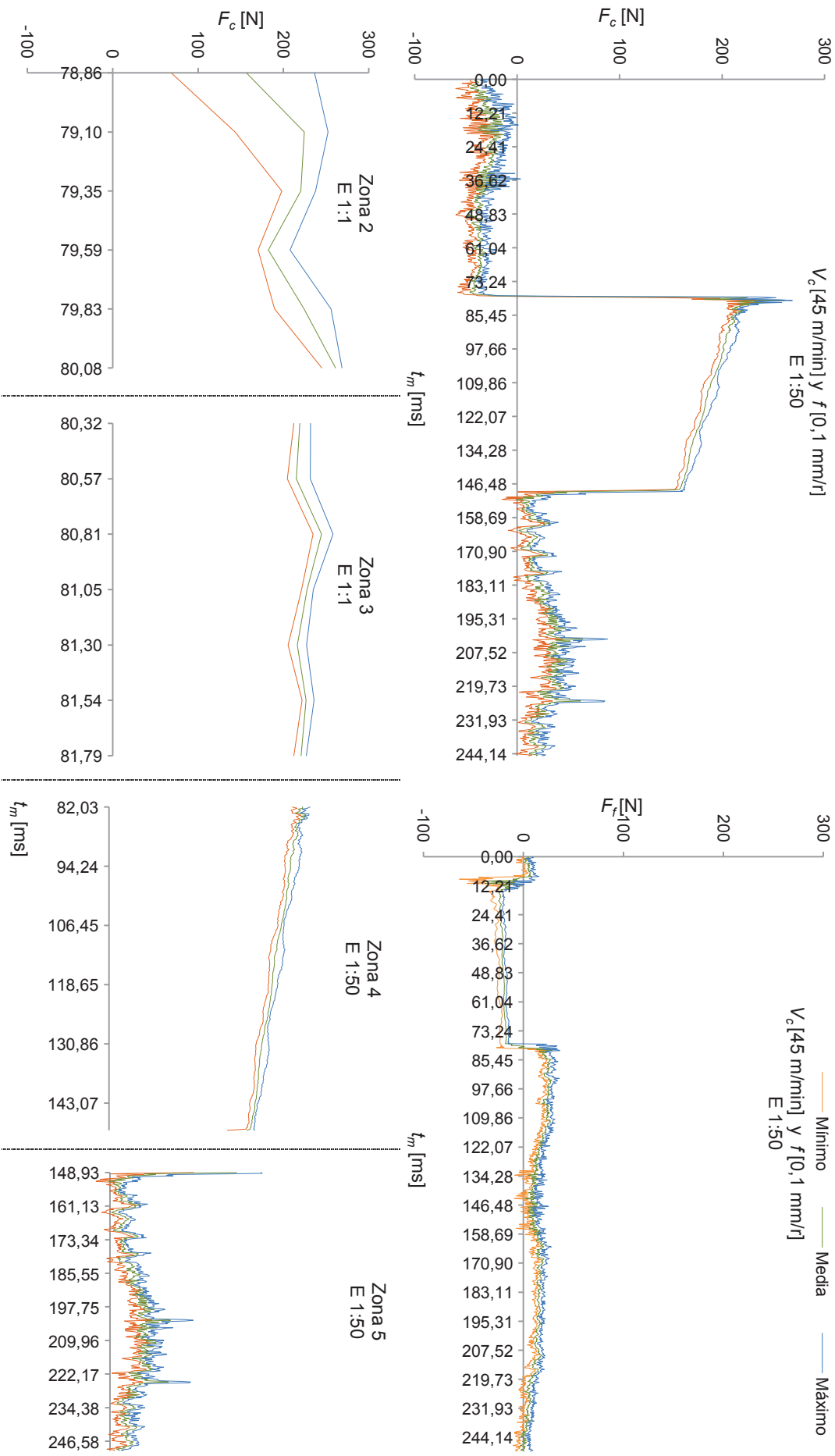


Figura A.VII.6 Evolución de  $F_c$  y  $F_t$  para  $V_c$  [45 m/min] y  $f$  [0,1 mm/r].

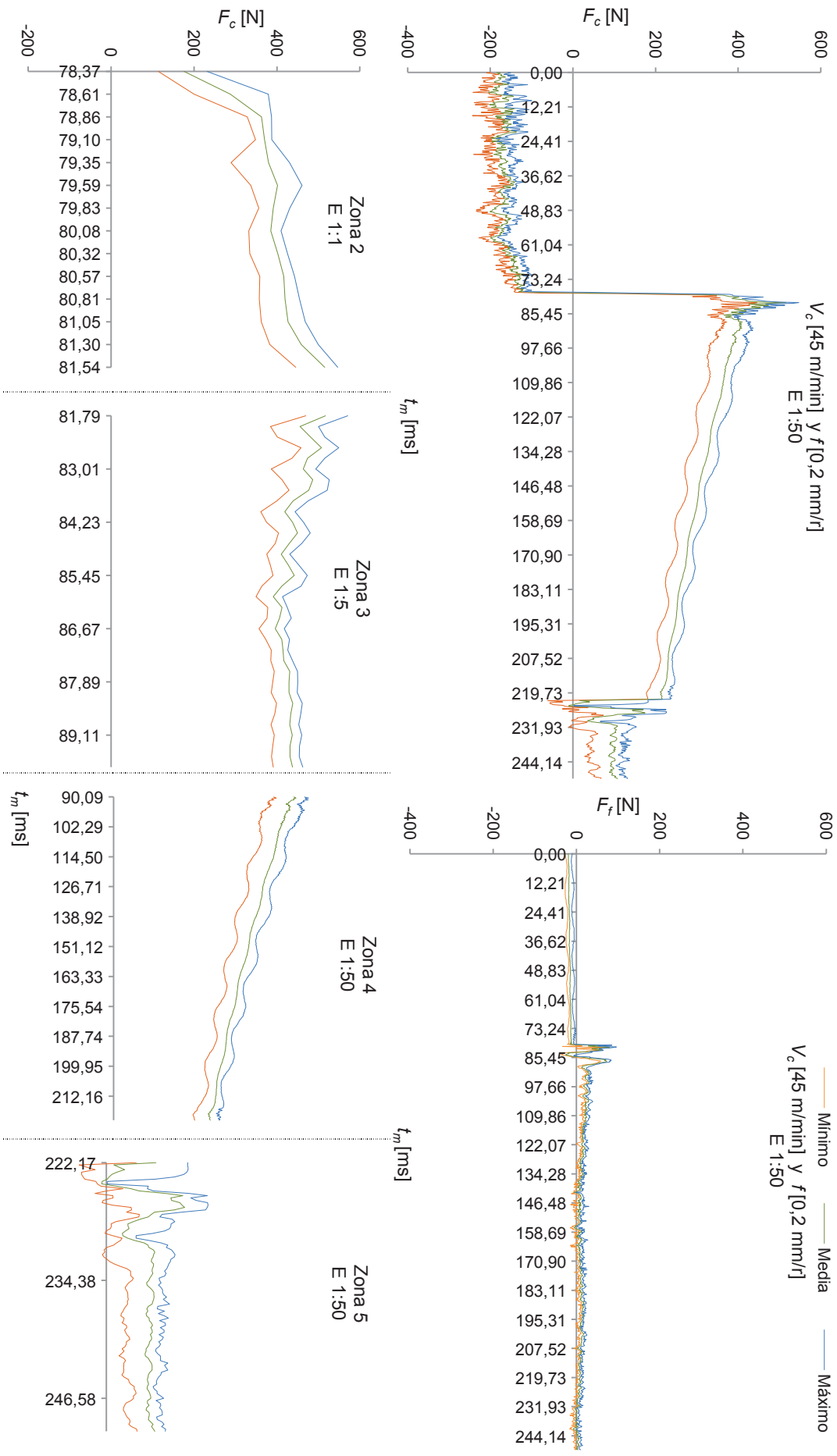


Figura A.VII.7 Evolución de  $F_c$  y  $F_t$  para  $V_c$  [45 m/min] y  $f$  [0.2 mm/r].

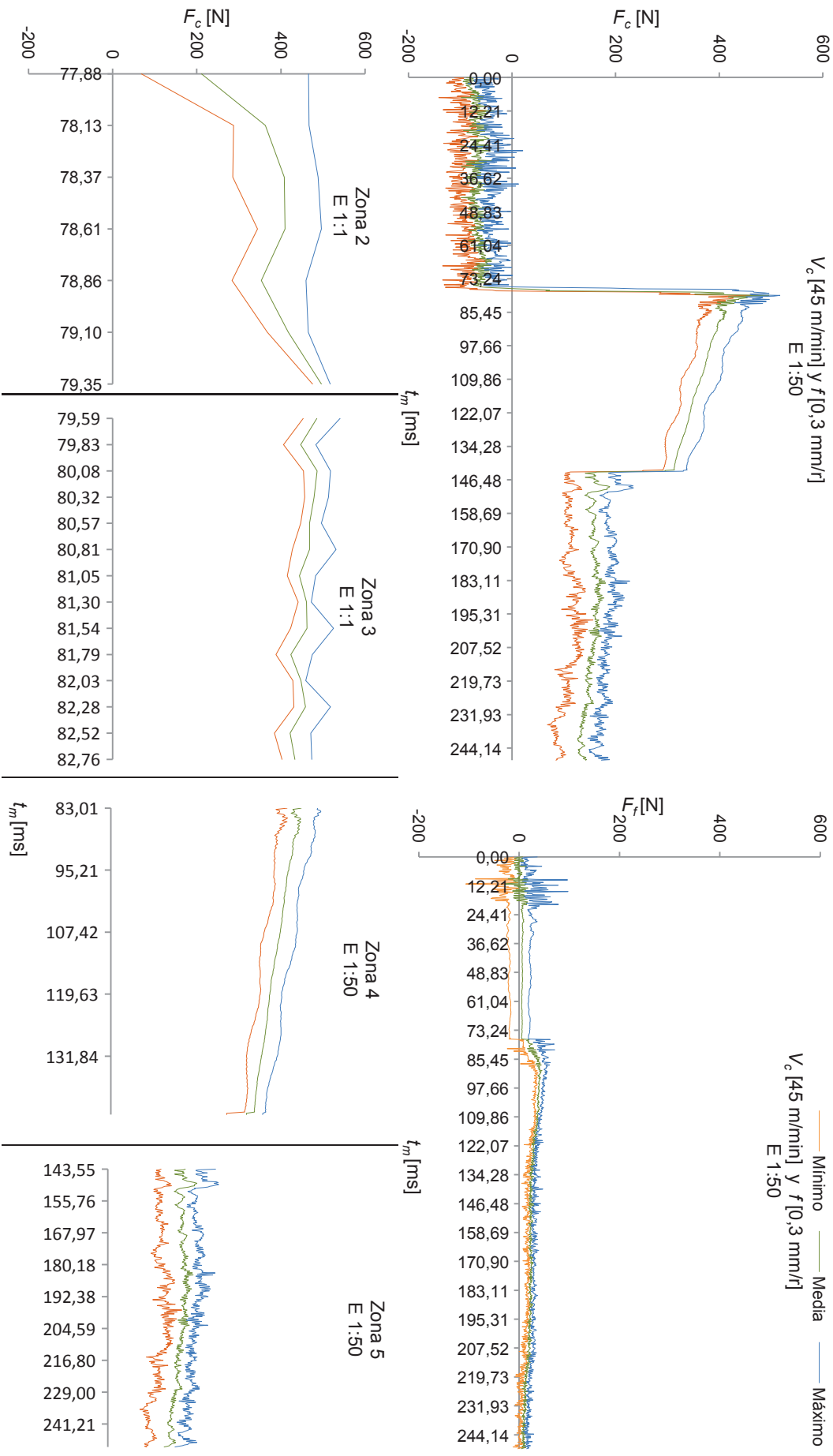


Figura A.VII.8 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [45 m/min] y  $f$  [0,3 mm/r].



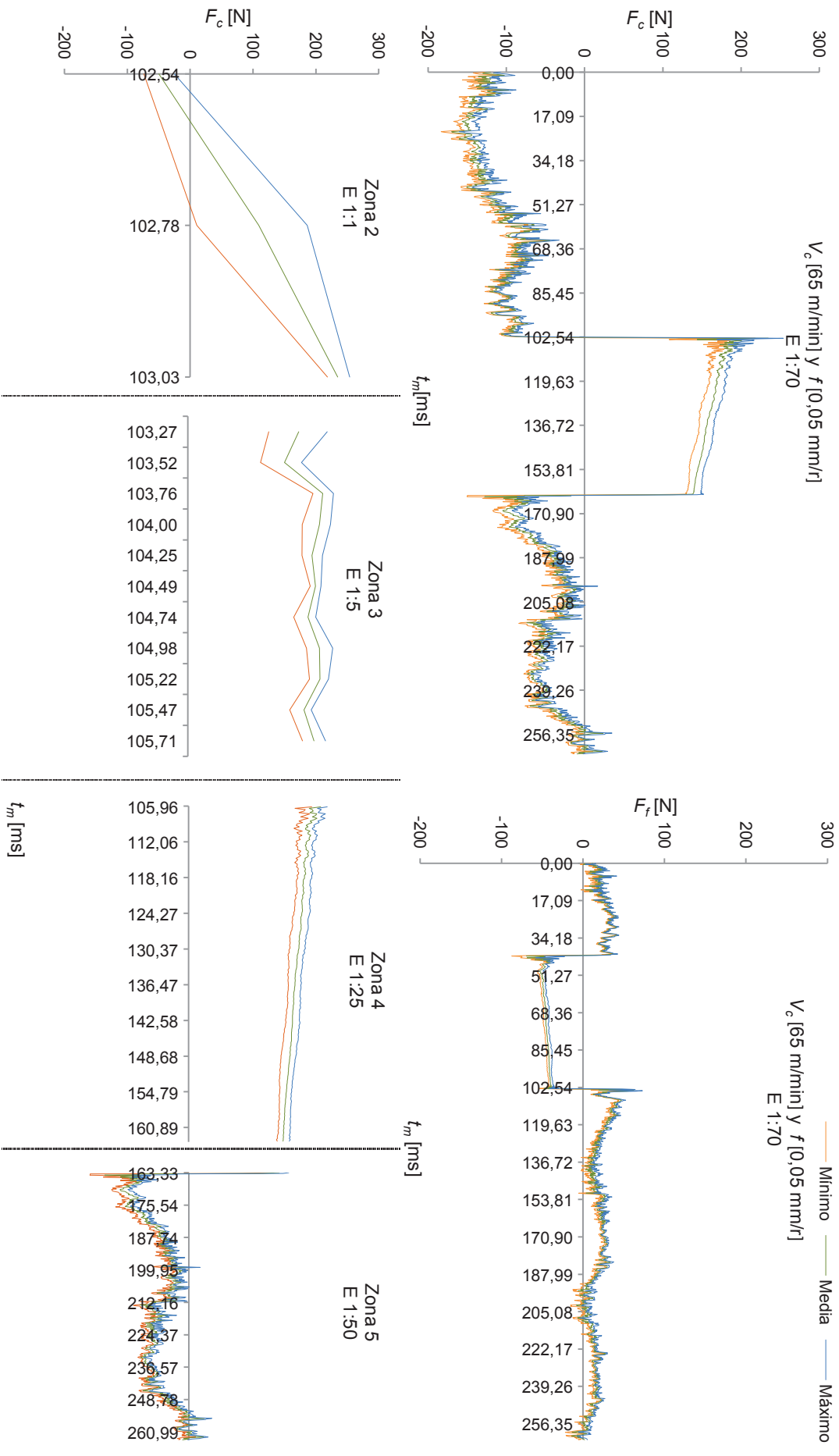


Figura A.VII.9 Evolución de  $F_c$  y  $F_t$  para  $V_c$  [65 m/min] y  $f$  [0,05 mm/r].

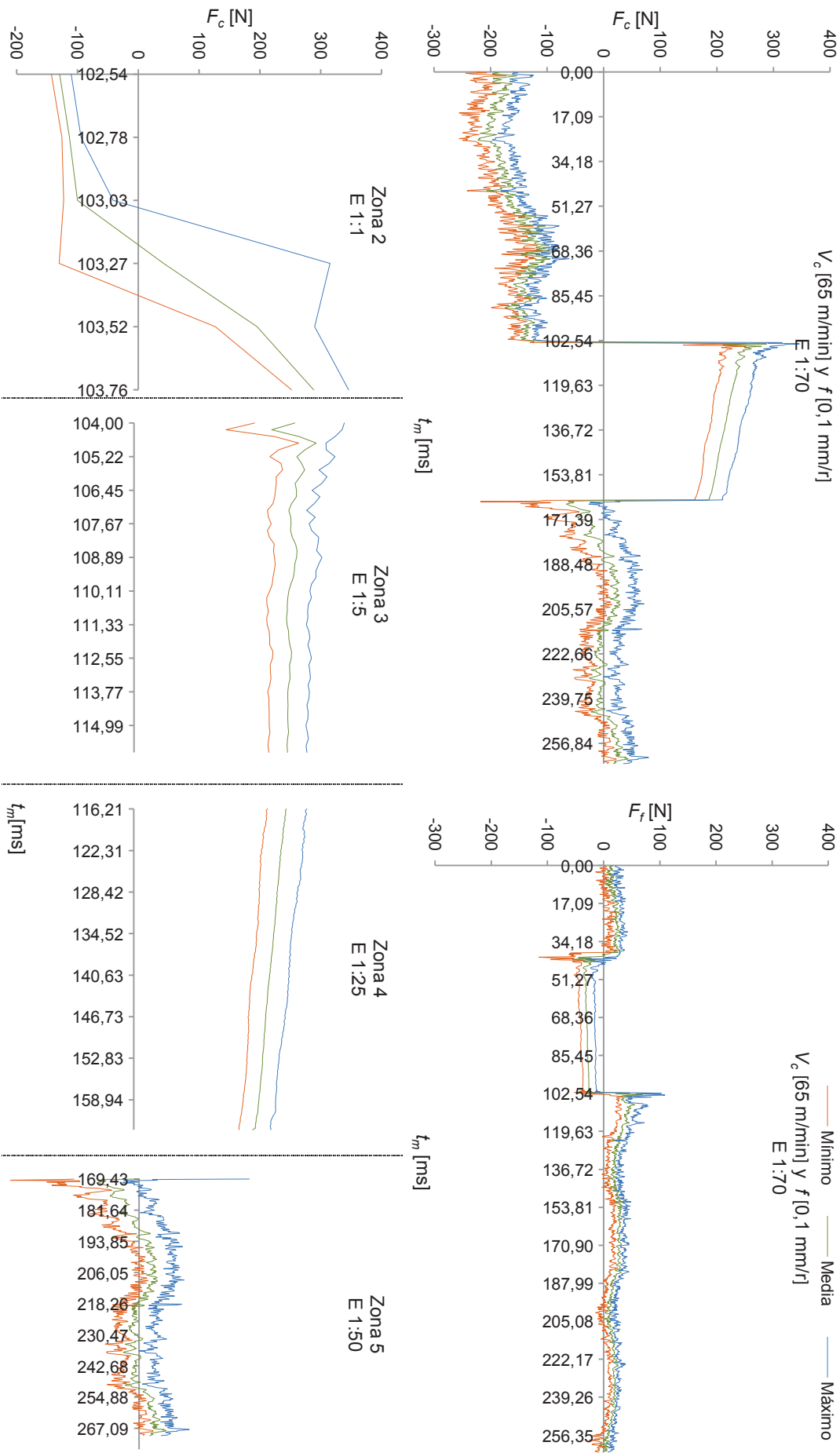


Figura A.VII.10 Evolución de  $F_c$  y  $F_t$  para  $V_c$  [65 m/min] y  $f$  [0,1 mm/r].

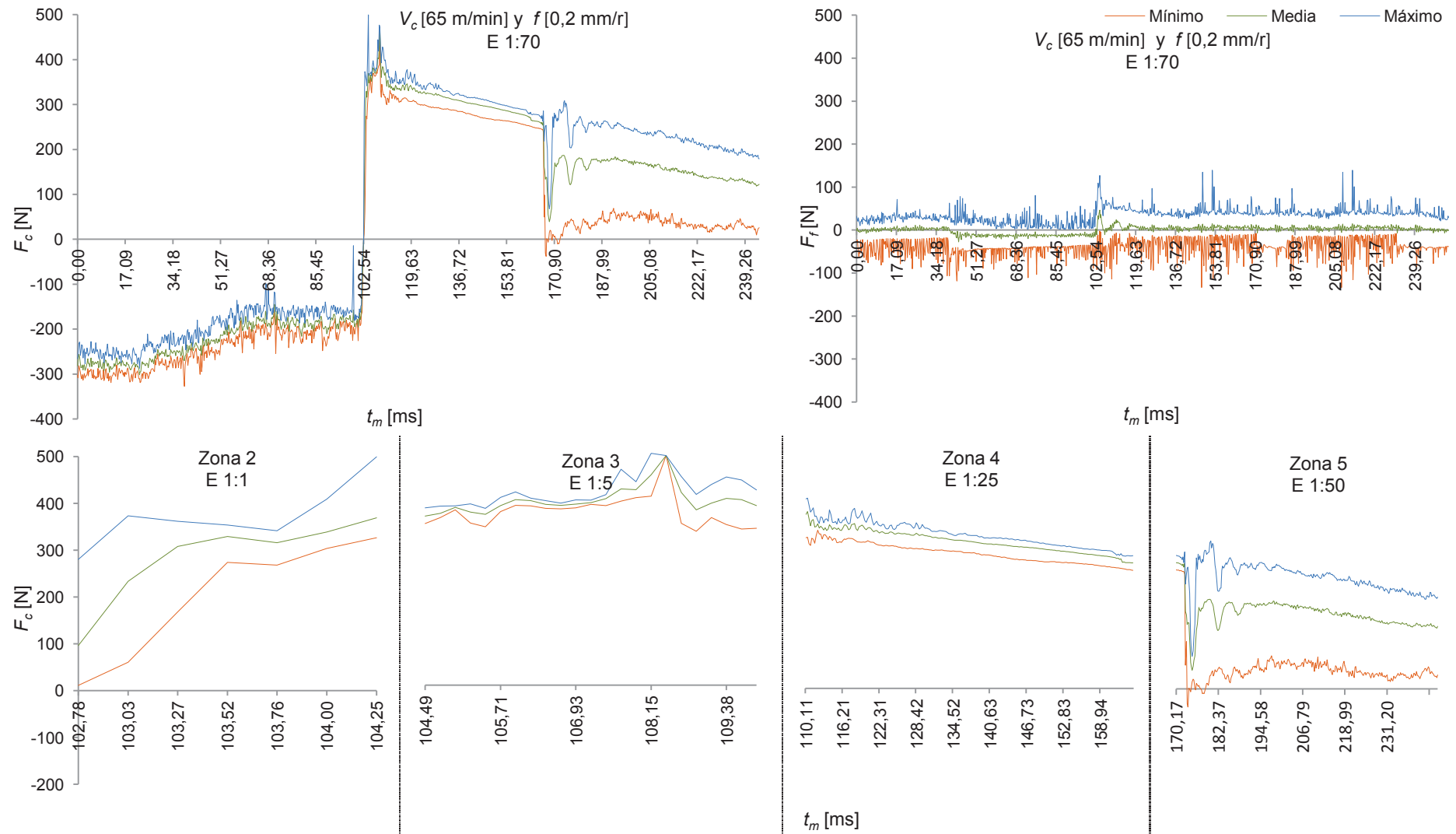


Figura A.VII.11 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [65 m/min] y  $f$  [0,2 mm/r].

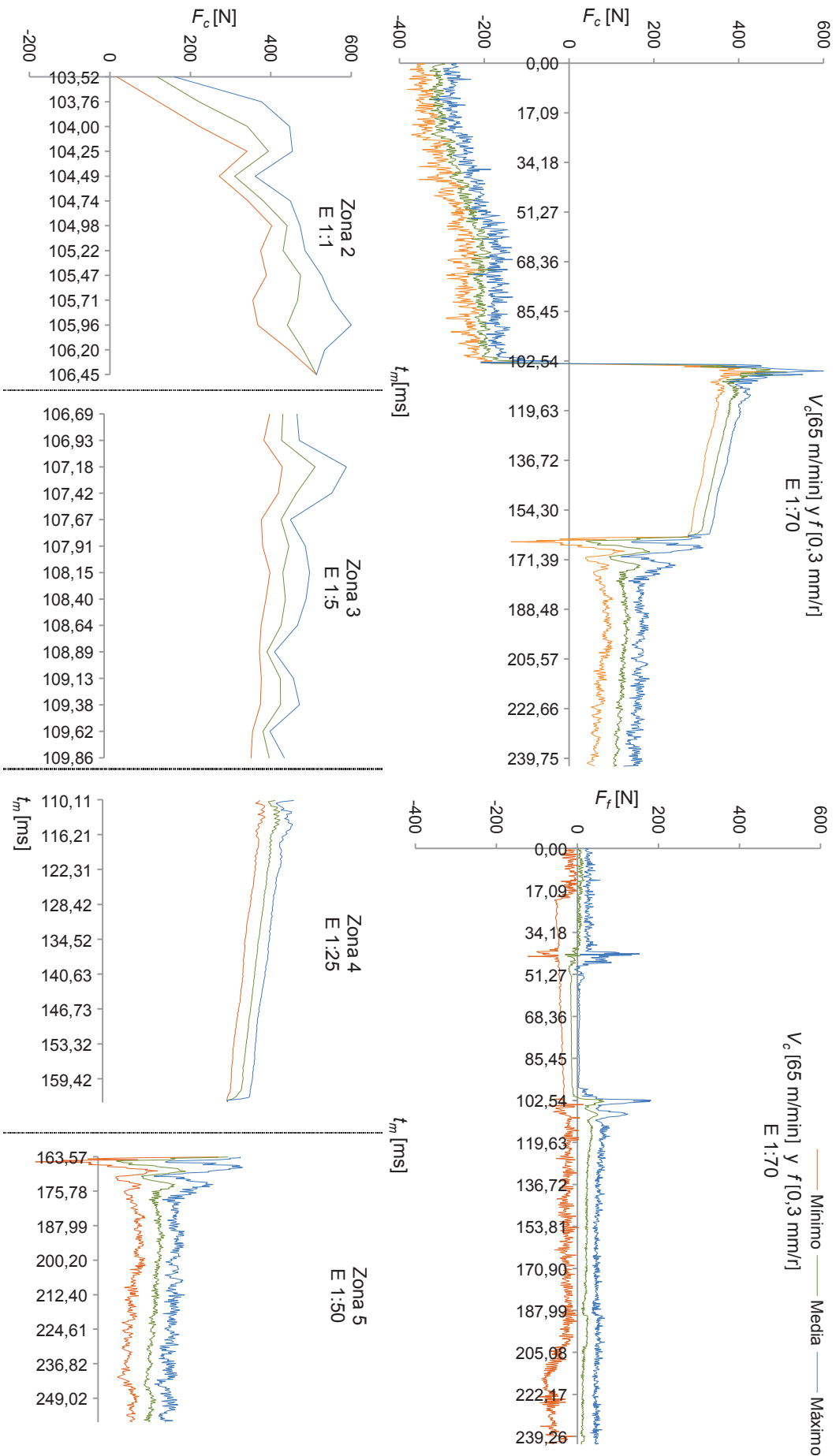
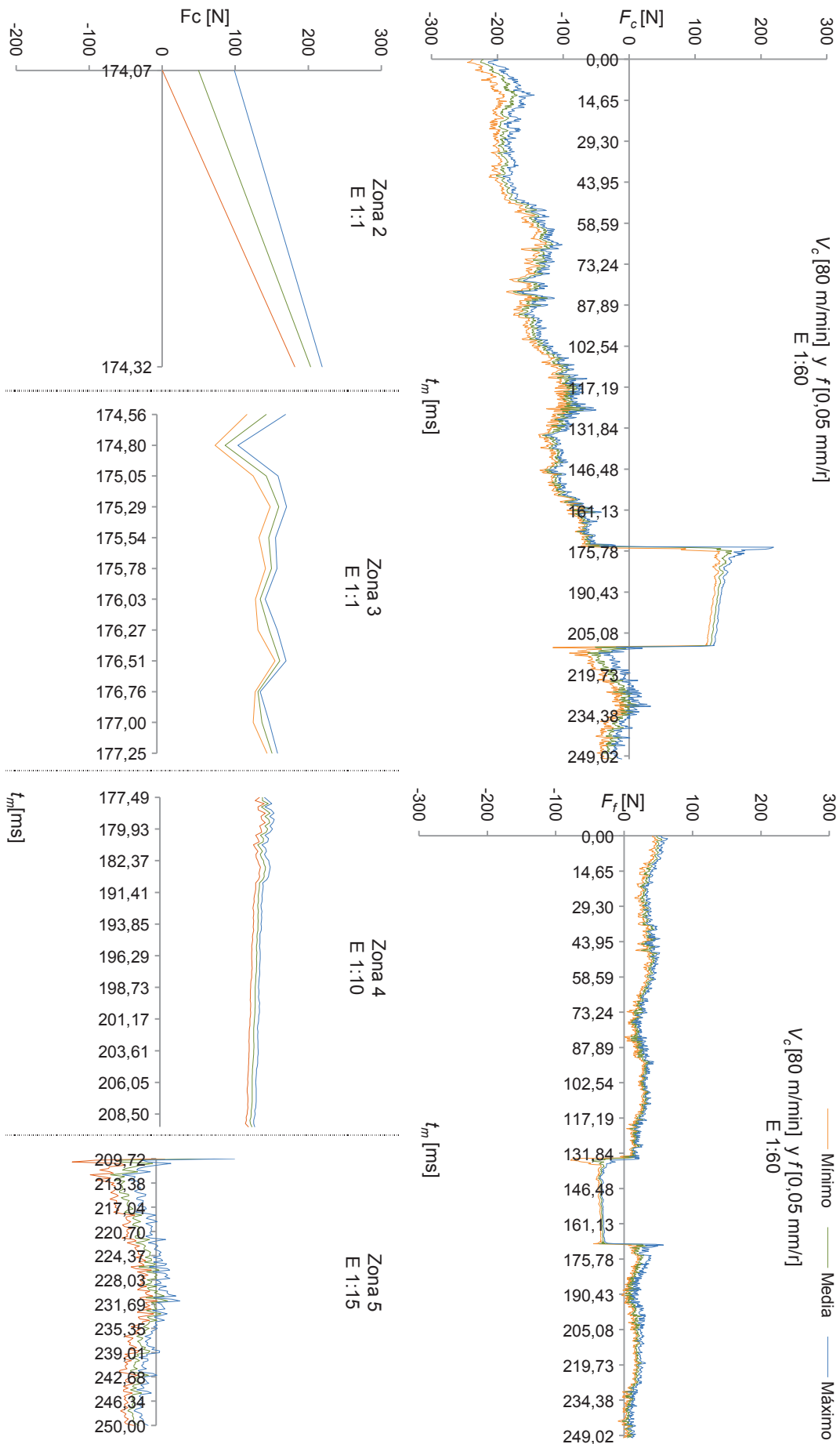


Figura A.VII.12 Evolución de  $F_c$  y  $F_t$  para  $V_c$  [65 m/min] y  $f$  [0,3 mm/r].



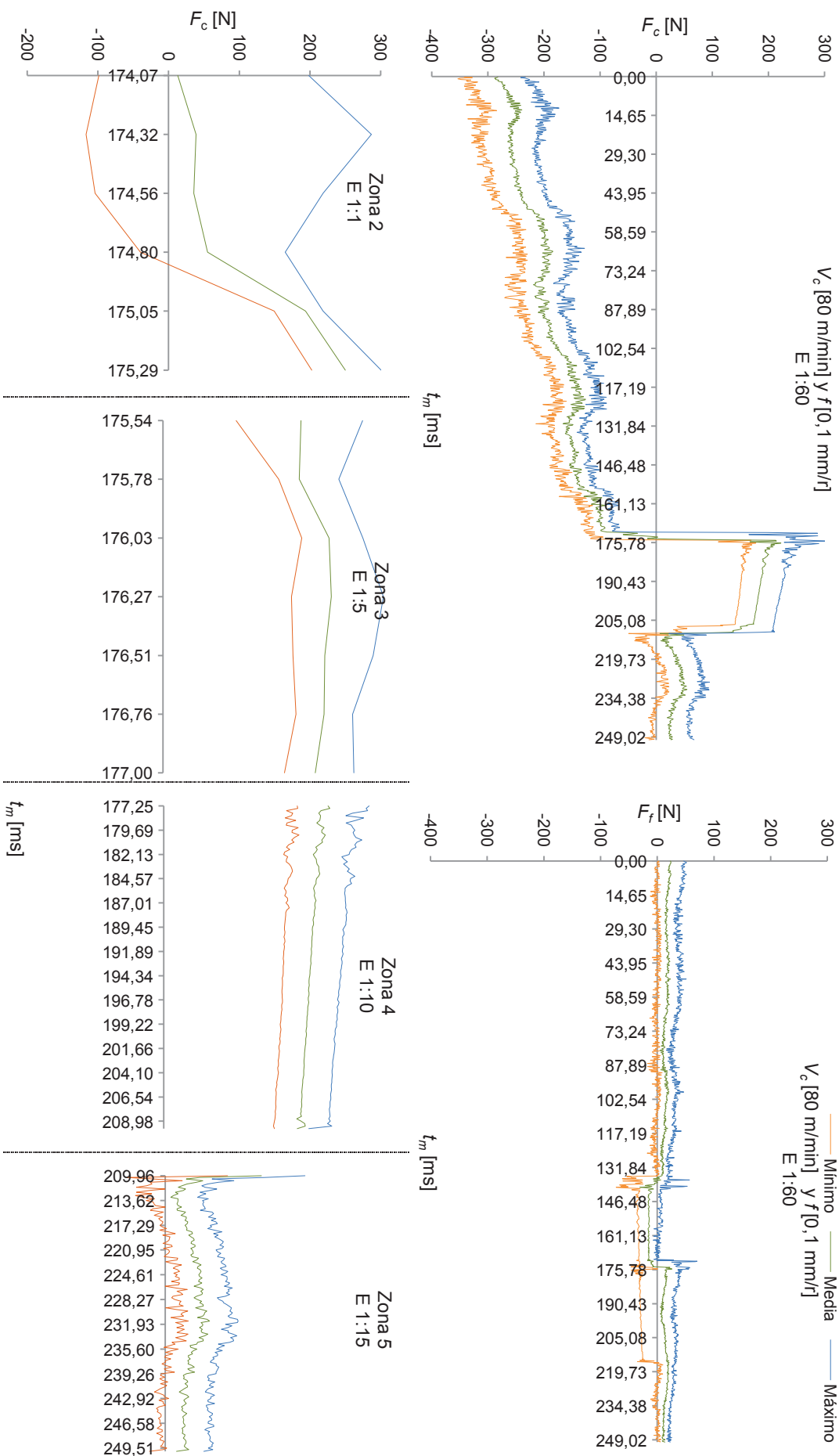


Figura A.VII.14 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [80 m/min] y  $f$  [0,1 mm/r].

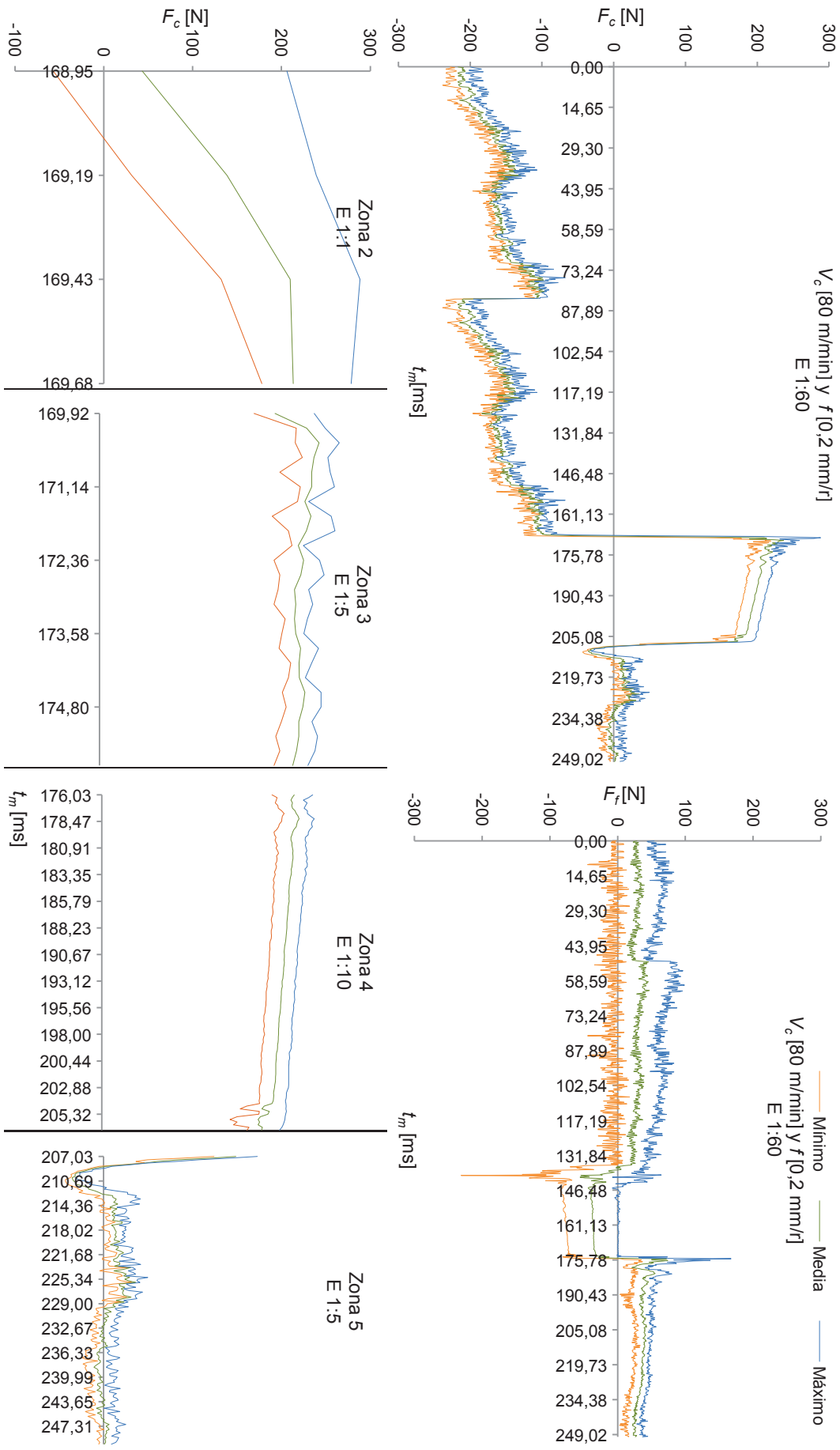


Figura A.VII.15 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [80 m/min] y  $f$  [0,2 mm/r].



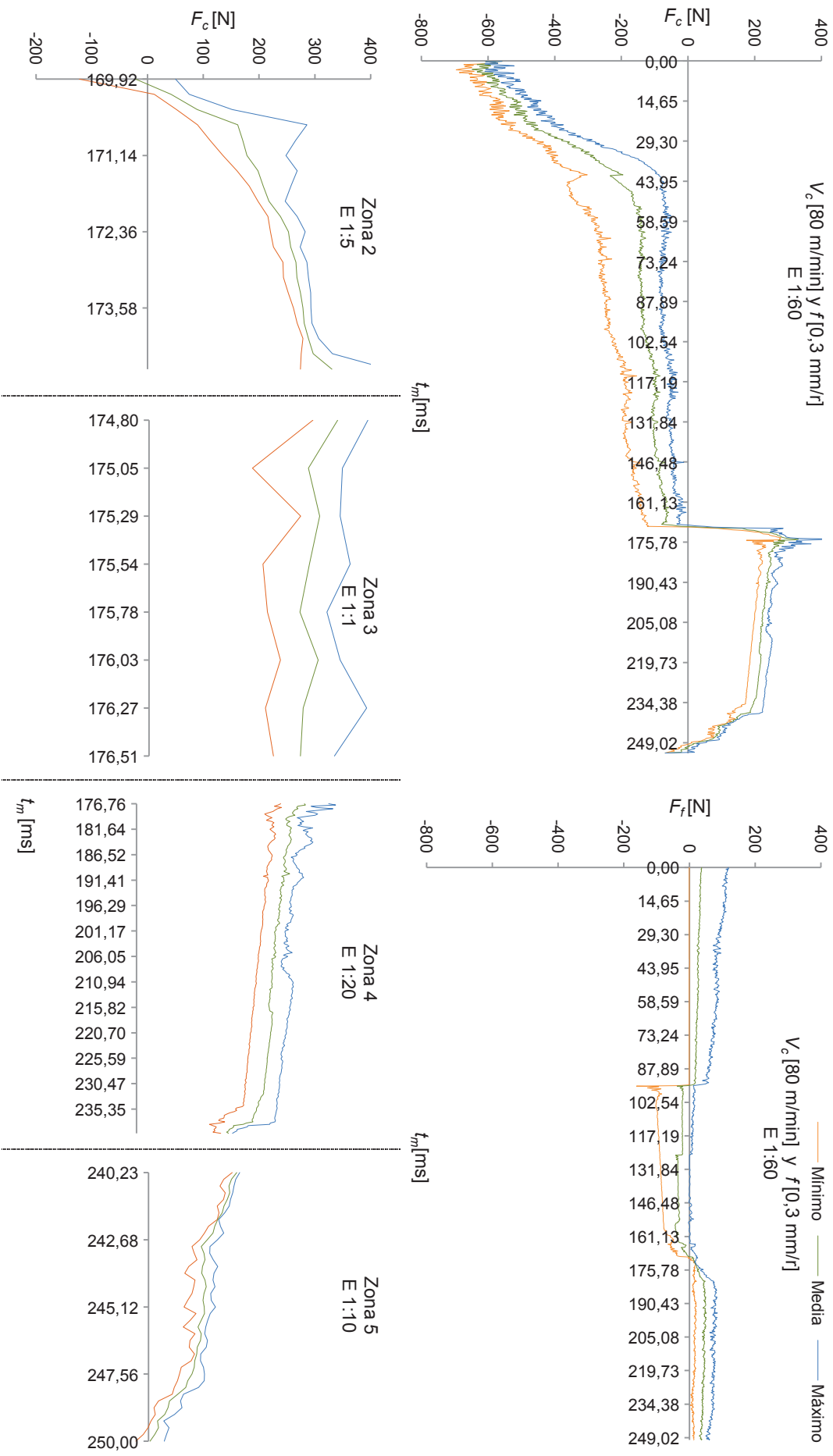


Figura A.VII.16 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [80 m/min] y  $f$  [0,3 mm/r].

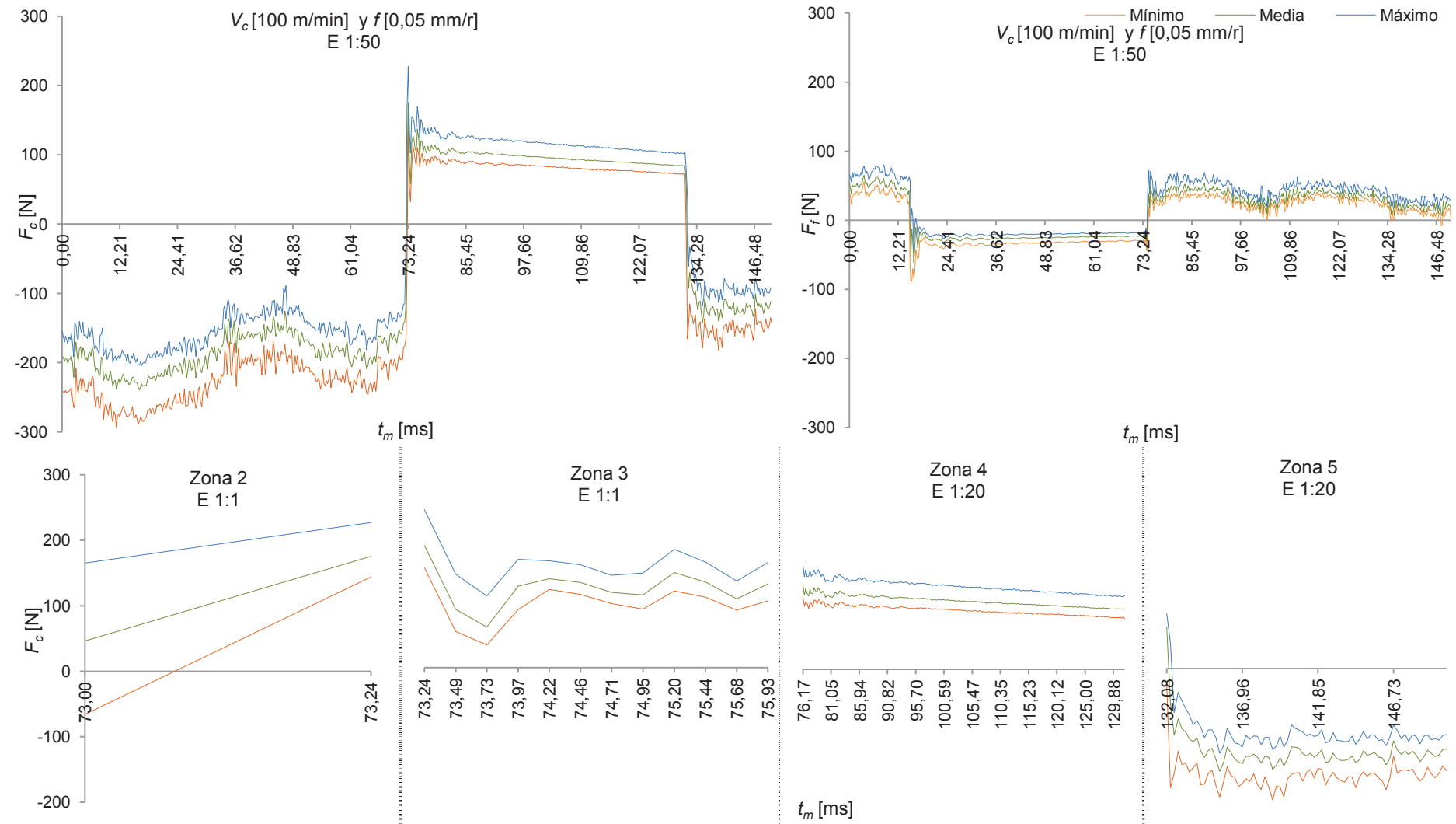


Figura A.VII.17 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [100 m/min] y  $f$  [0,05 mm/r].

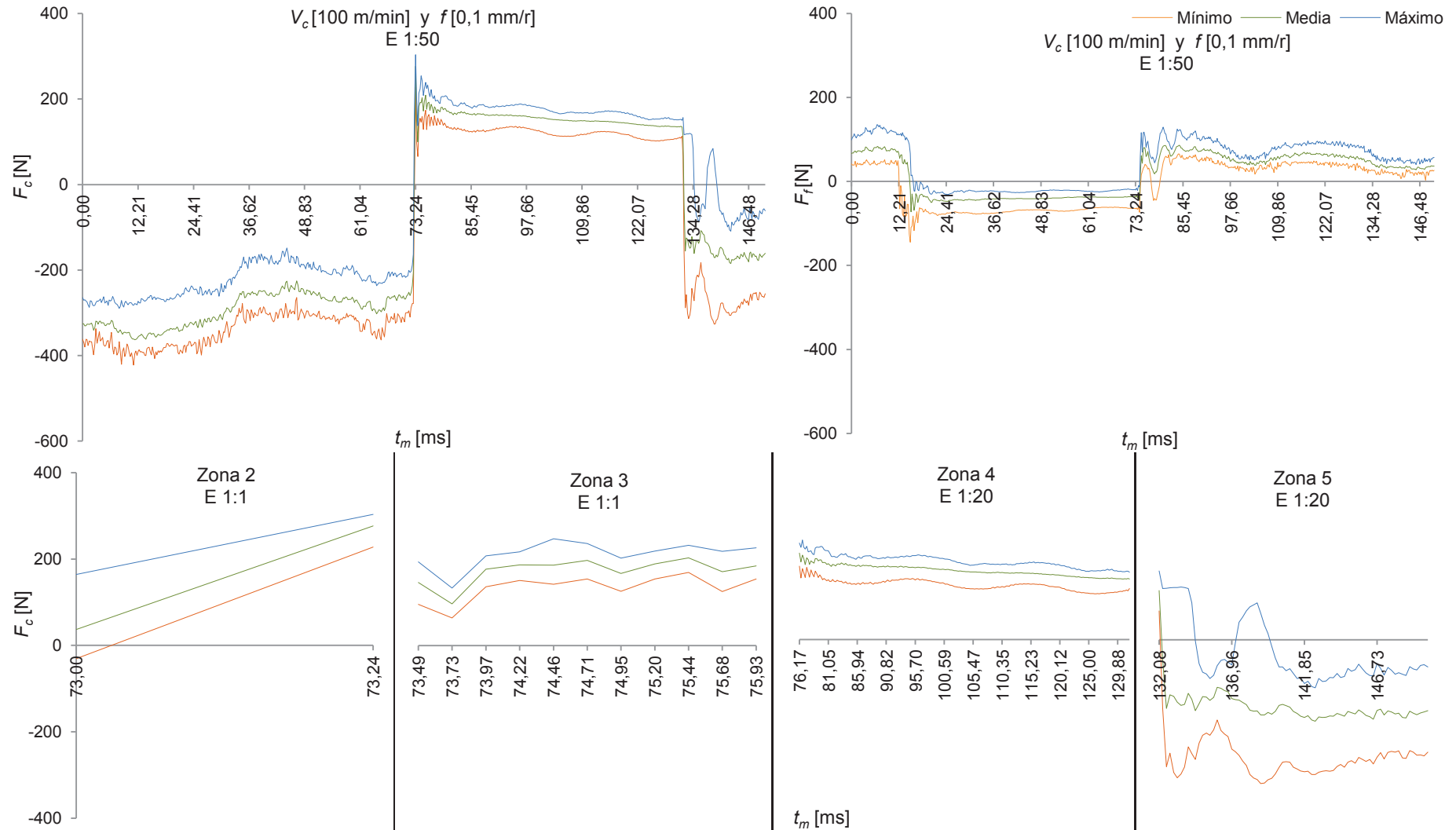


Figura A.VII.18 Evolución de  $F_c$  y  $F_r$  para  $V_c$  [100 m/min] y  $f$  [0,1 mm/r].

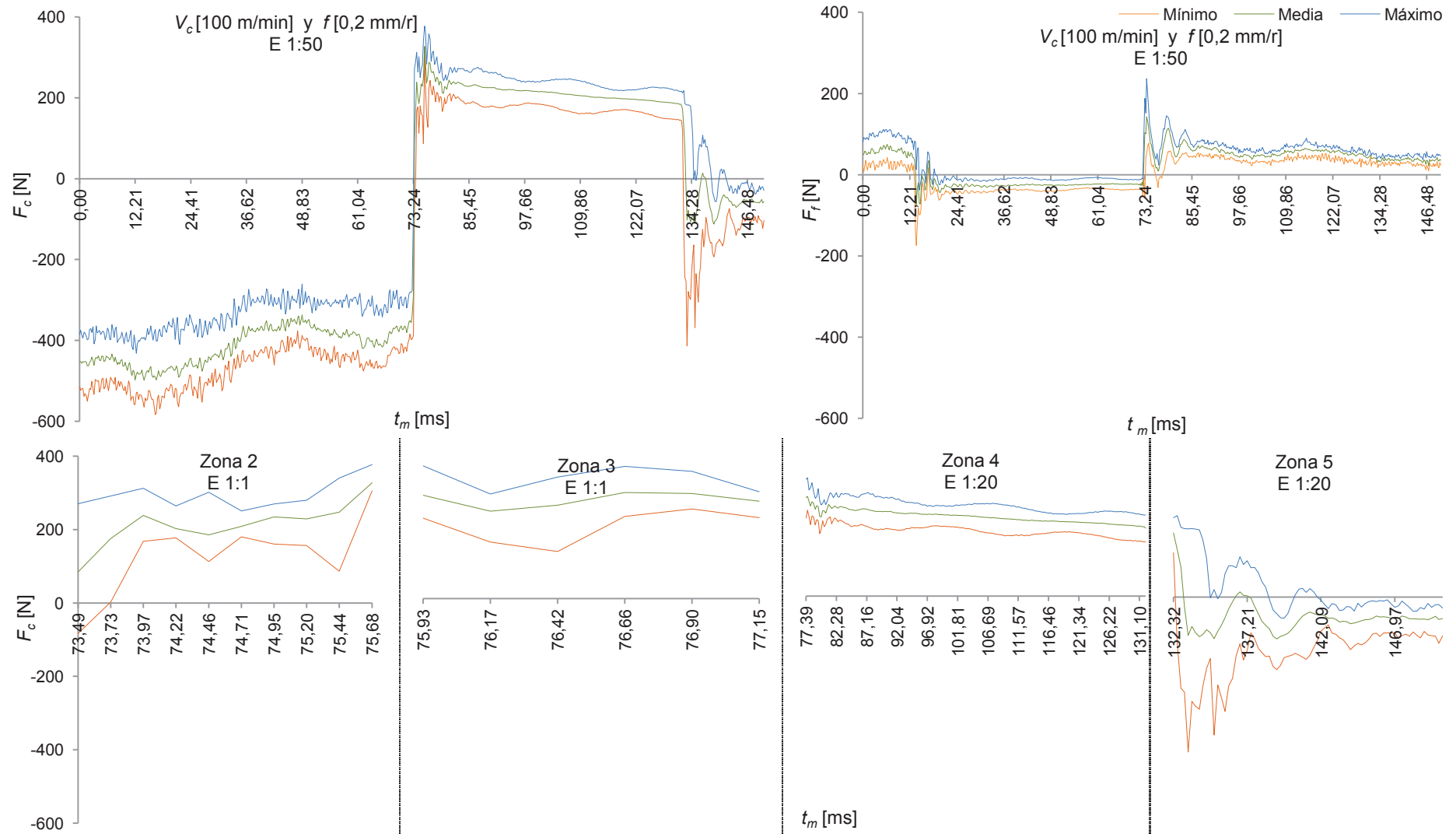


Figura A.VII.19 Evolución de  $F_c$  y  $F_r$  para  $V_c$  [100 m/min] y  $f$  [0,2 mm/r].

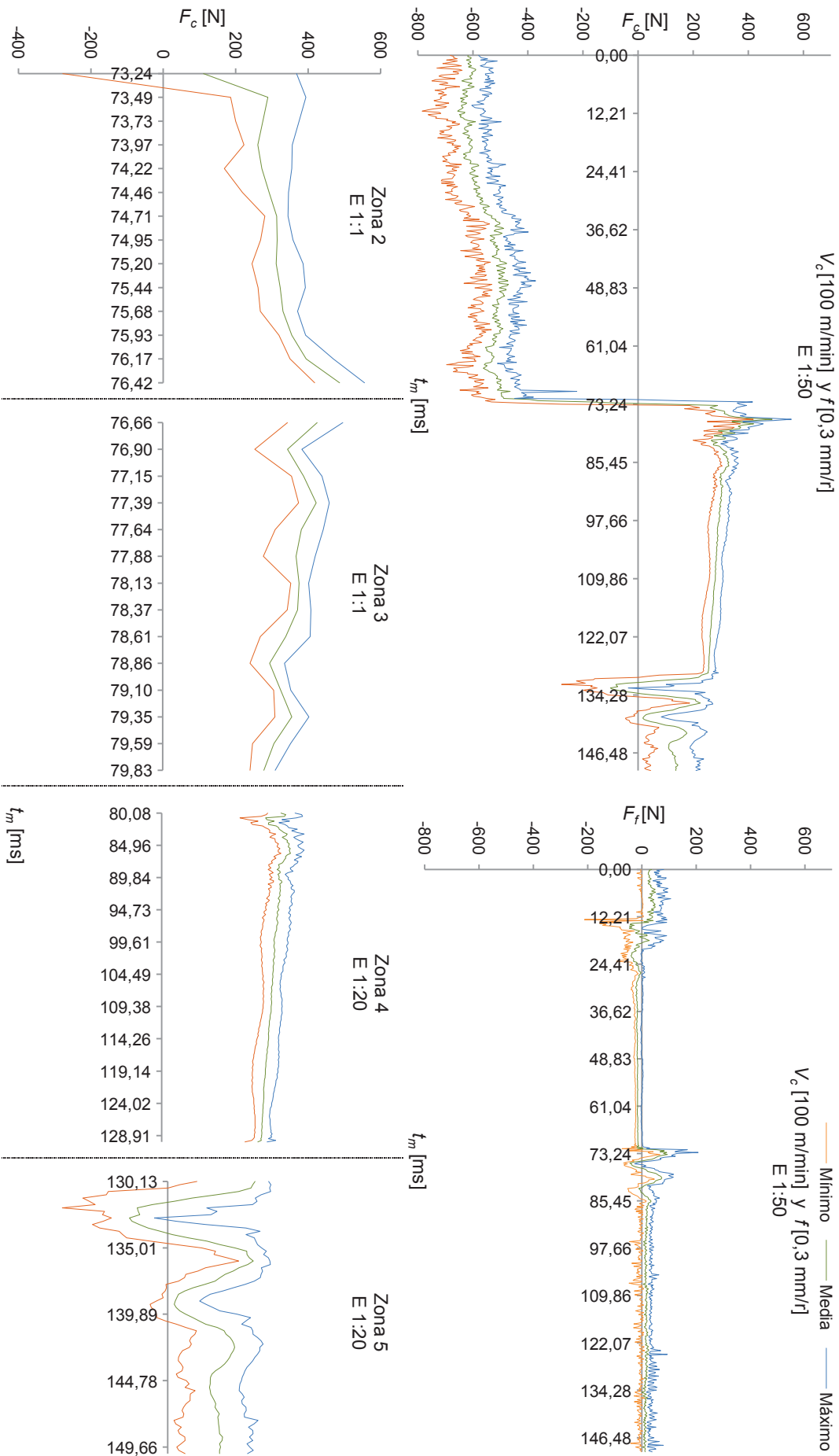


Figura A.VII.20 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [100 m/min] y  $f$  [0,3 mm/r].

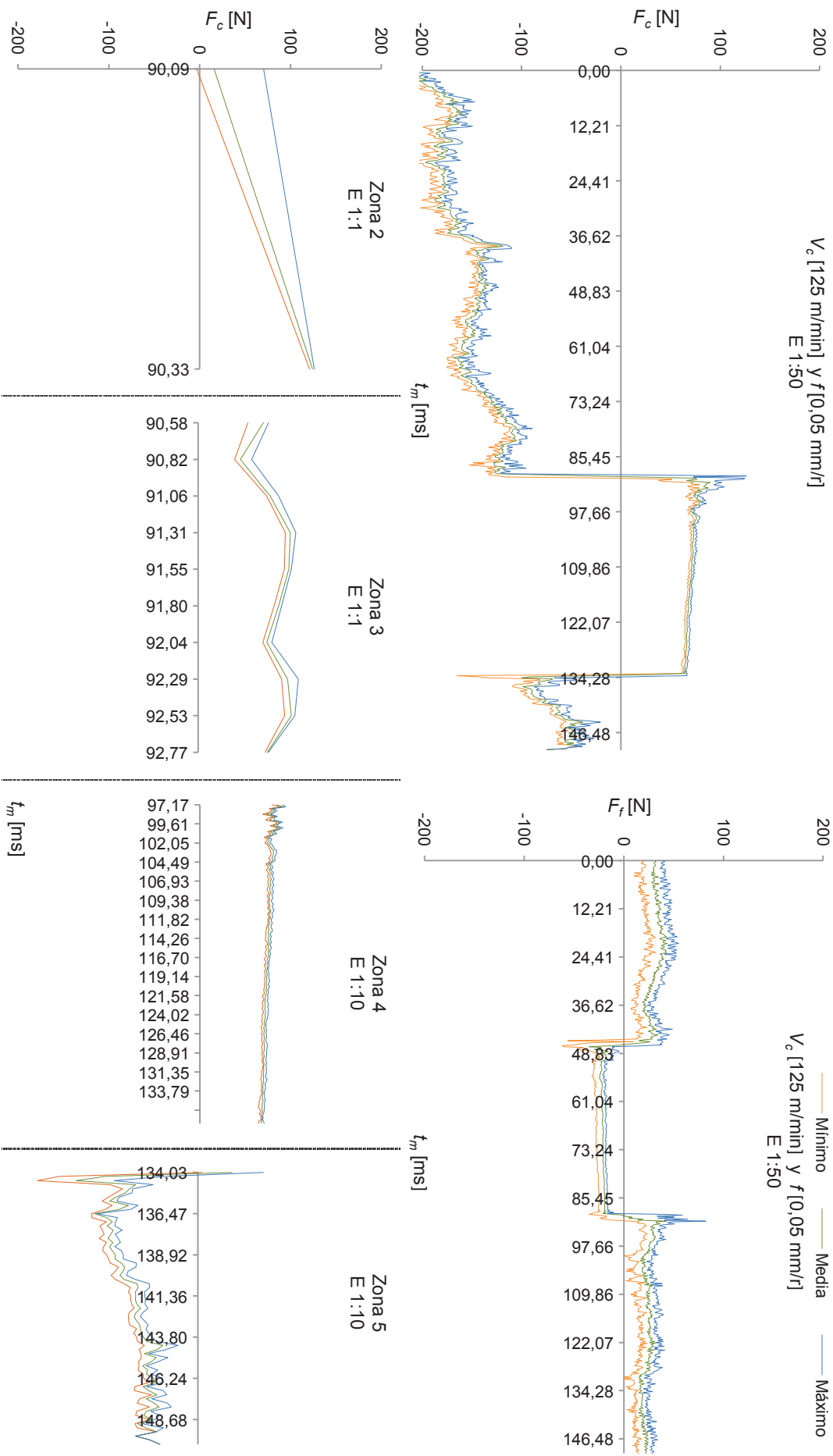


Figura A.VII.21 Evolución de  $F_c$  y  $F_t$  para  $V_c$  [125 m/min] y  $f$  [0,05 mm/r].

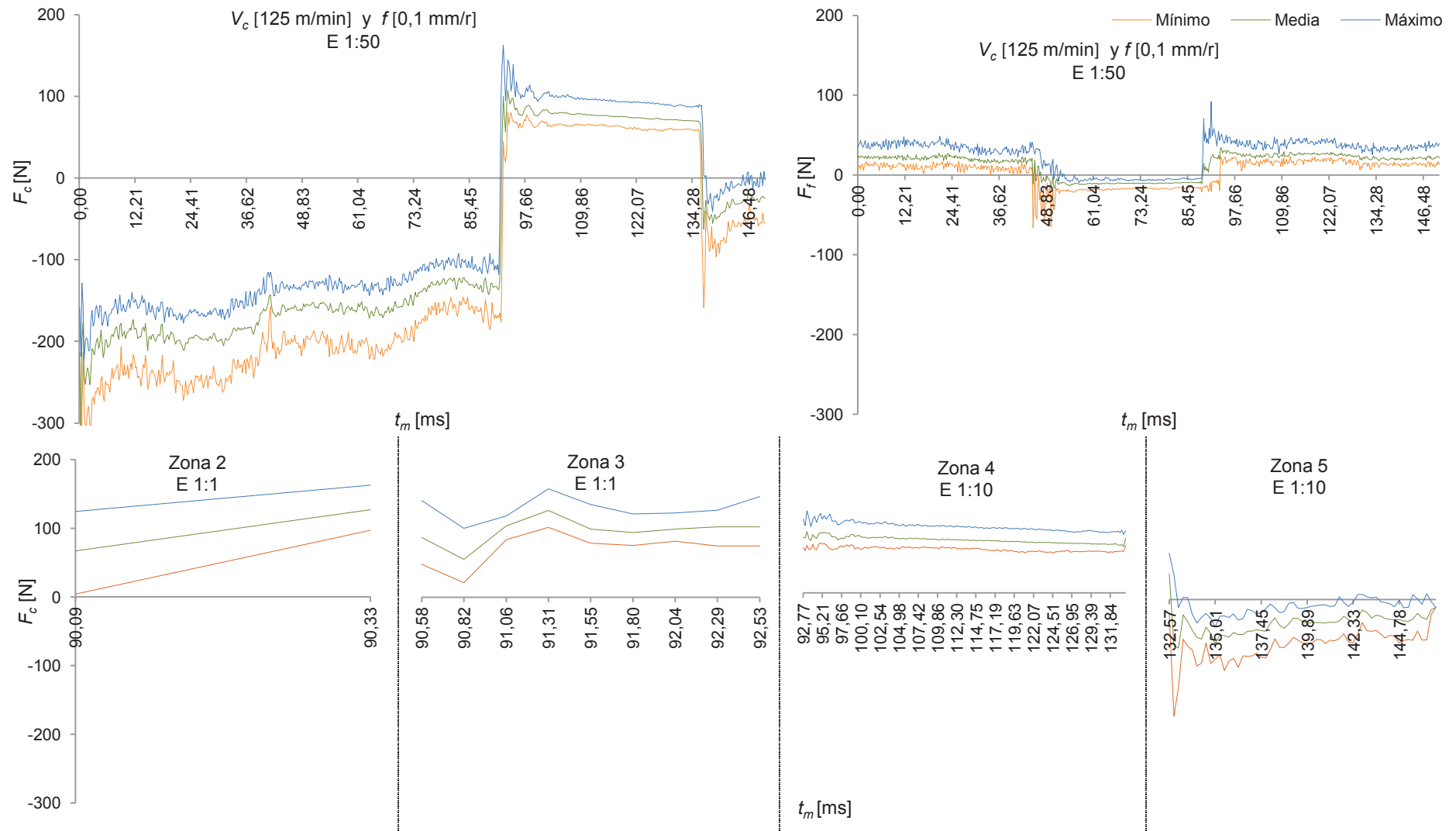


Figura A.VII.22 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c$  [125 m/min] y  $f$  [0,1 mm/r].



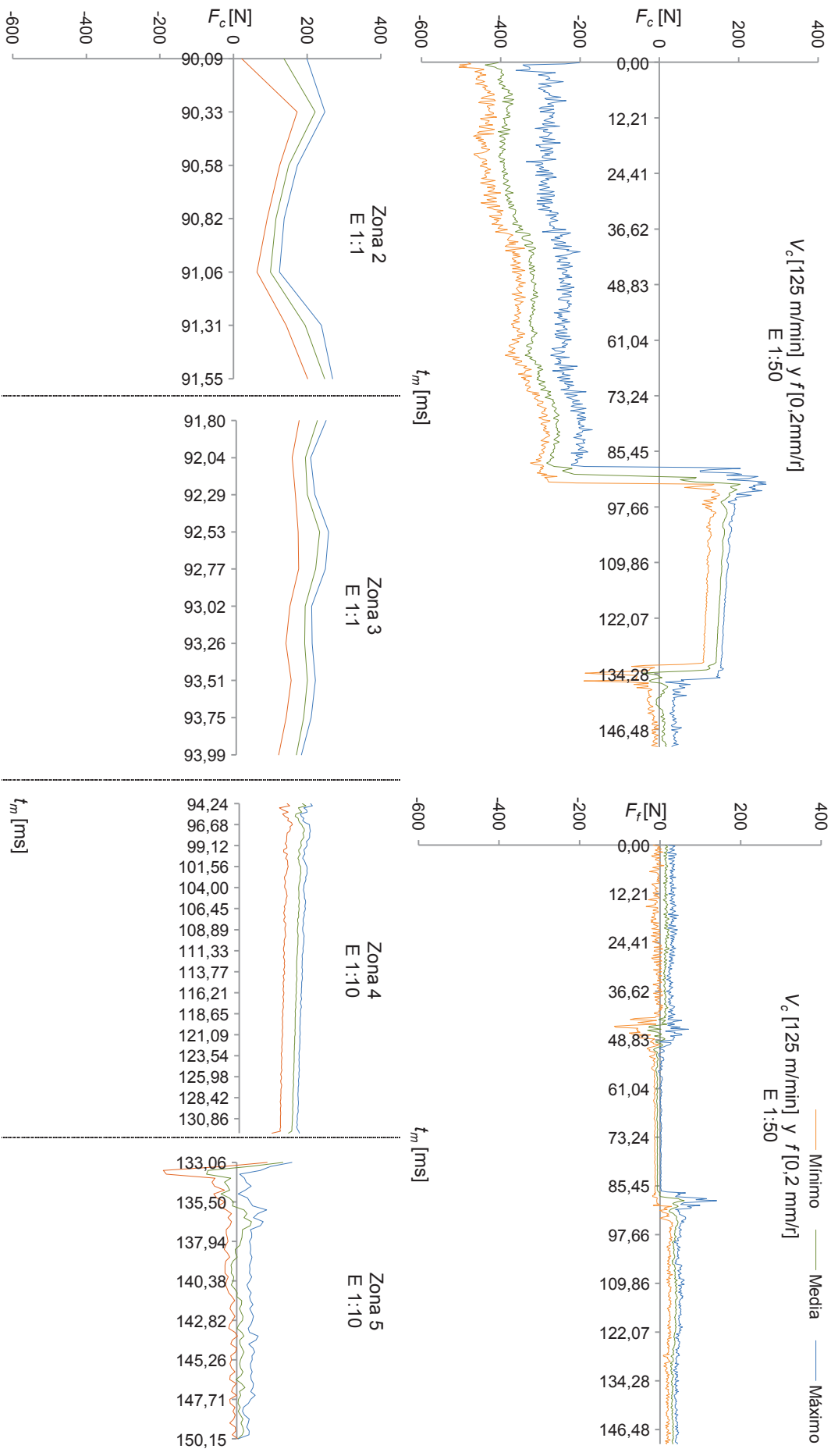


Figura A.VII.23 Evolución de  $F_c$  y  $F_f$  para  $V_c [125 \text{ m/min}]$  y  $f [0,2 \text{ mm/r}]$ .

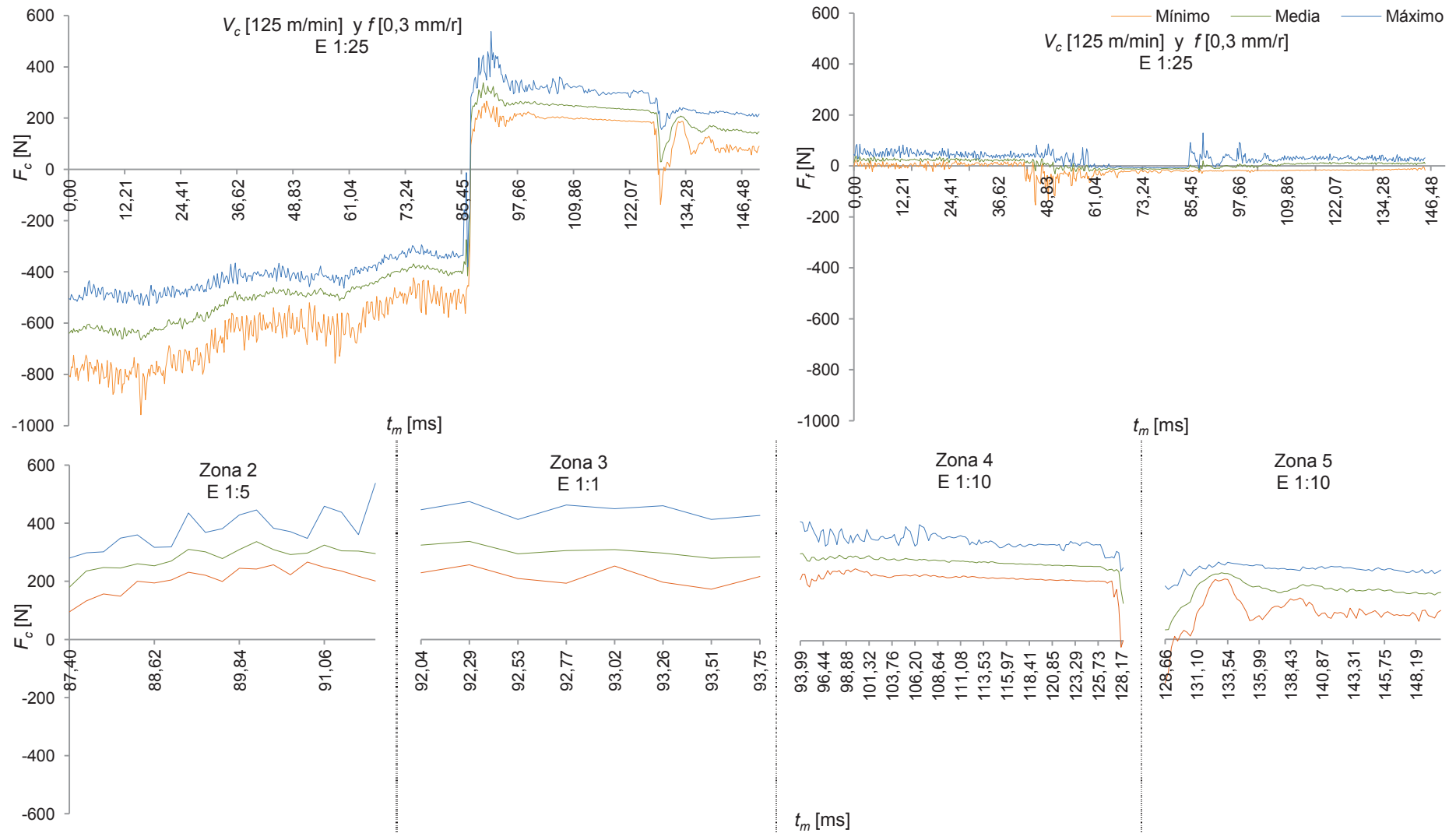


Figura A.VII.24 Evolución de  $F_c$  y  $F_r$  para  $V_c$  [125 m/min] y  $f$  [0,3 mm/r].





# ANEXO VIII

---

## GRÁFICAS REPRESENTATIVAS DE MODELOS AJUSTADOS



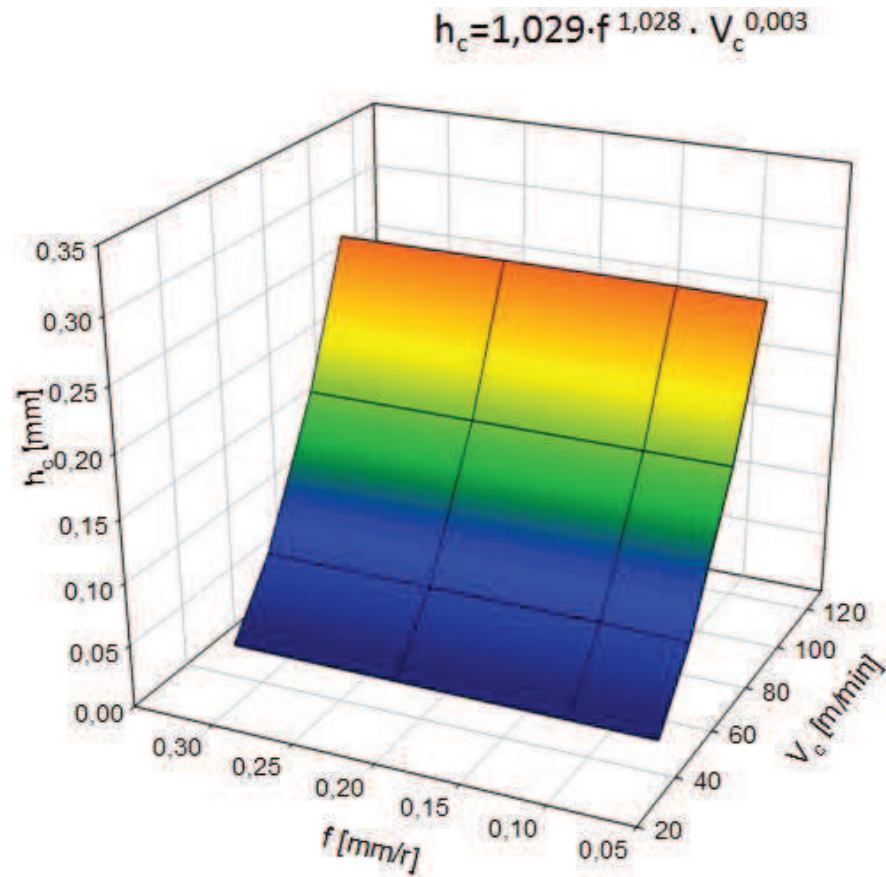
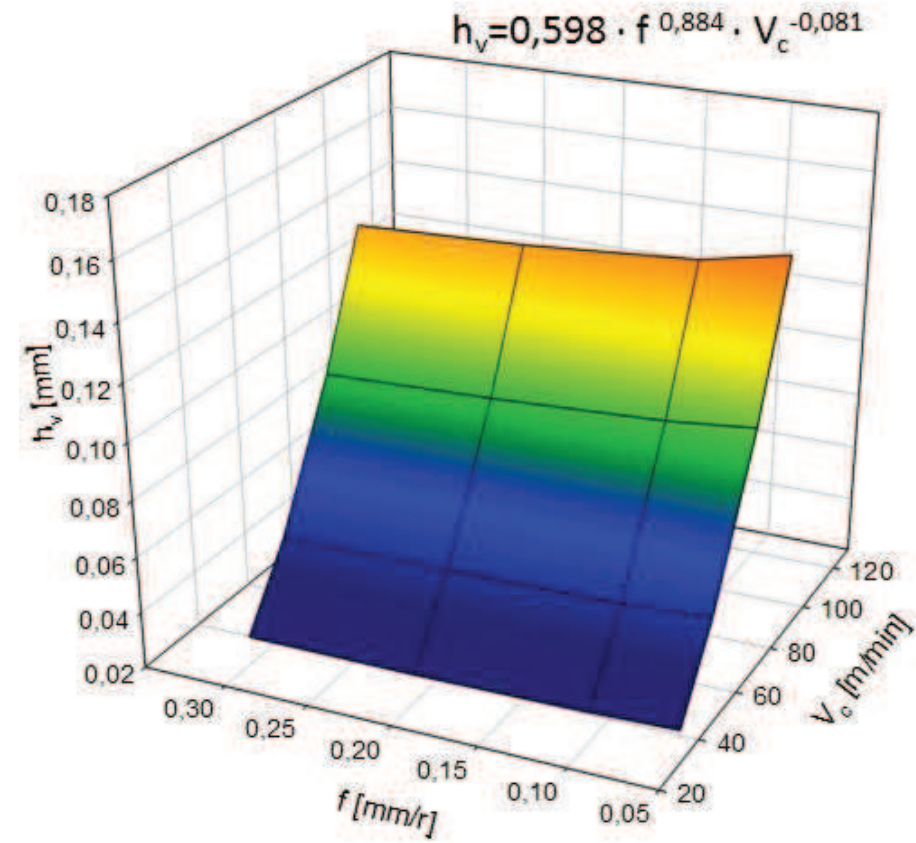
**Índice**

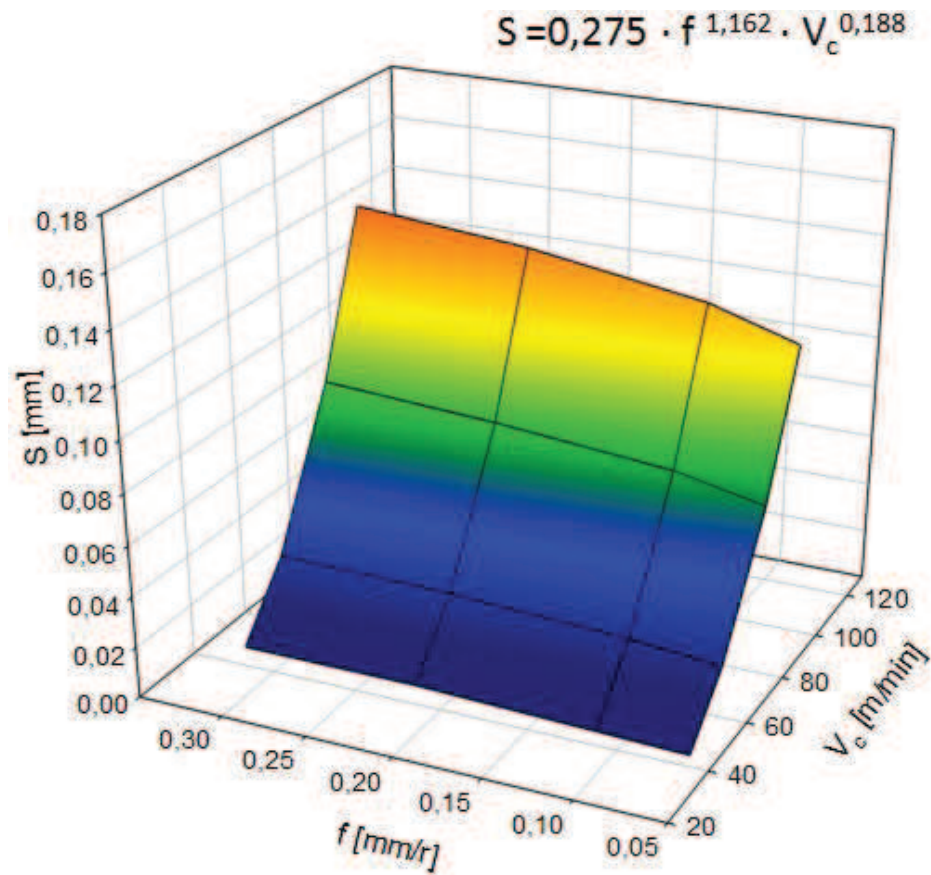
<b>A.VIII.1</b>	<b>Gráficas representativas de modelos ajustados .....</b>	<b>A.VIII.1</b>
-----------------	--	-----------------



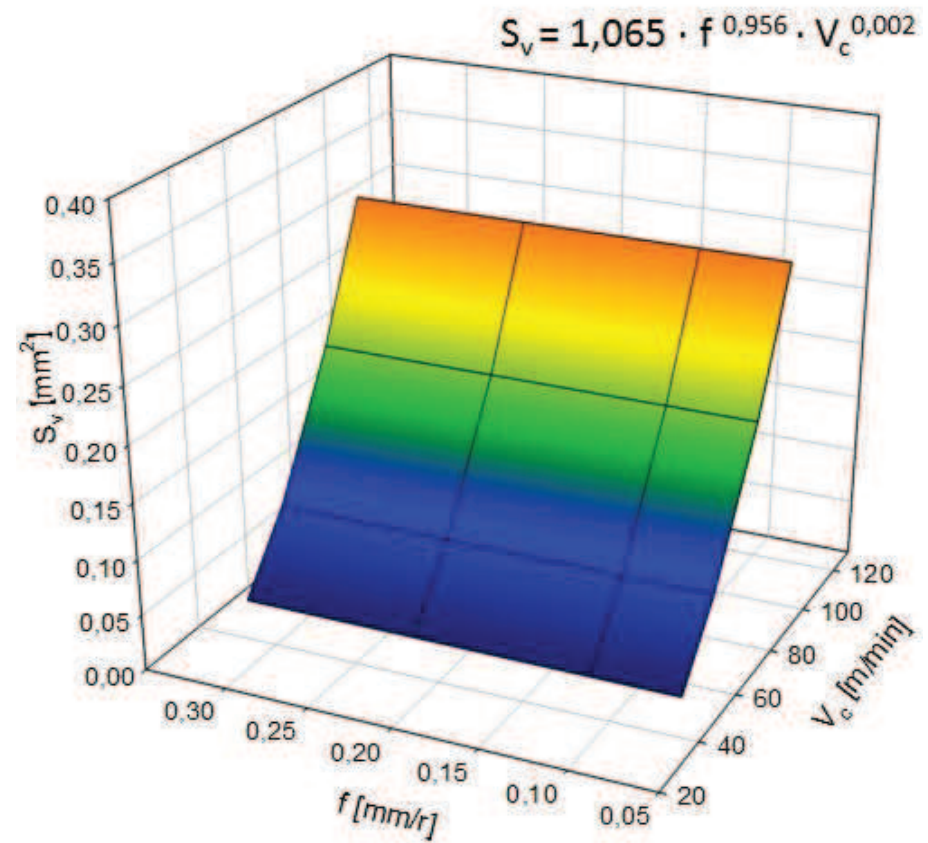


## A.VIII.1 Gráficas representativas de modelos ajustados

a) Representación de  $h_c$  respecto a  $f$ ,  $V_c$ b) Representación de  $h_v$  respecto a  $f$ ,  $V_c$

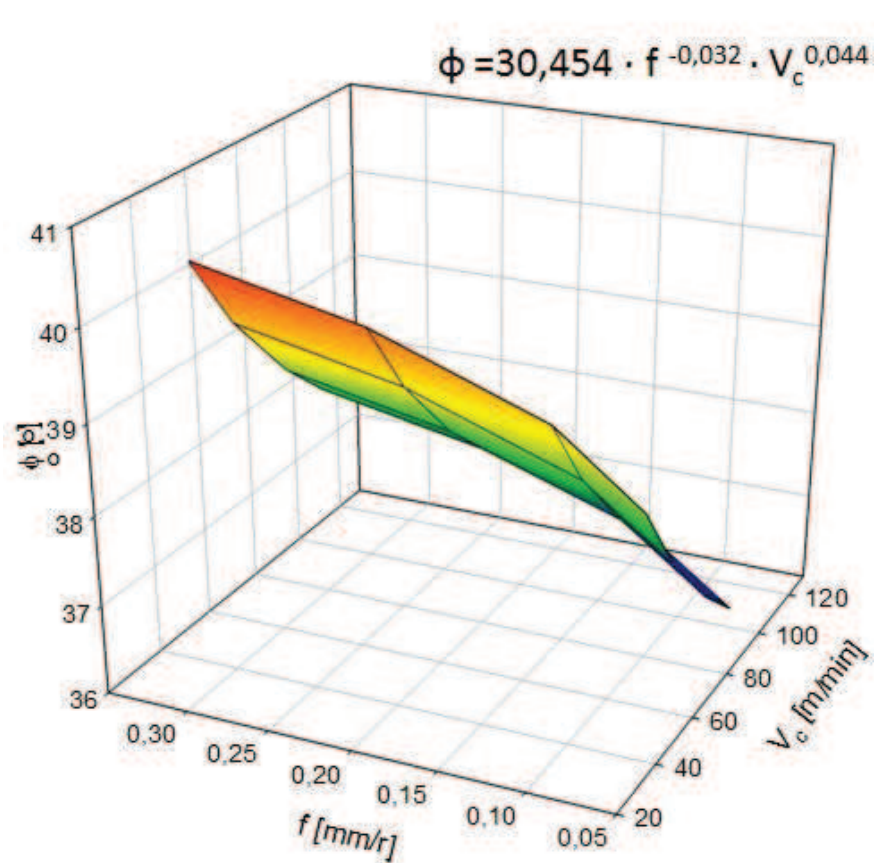
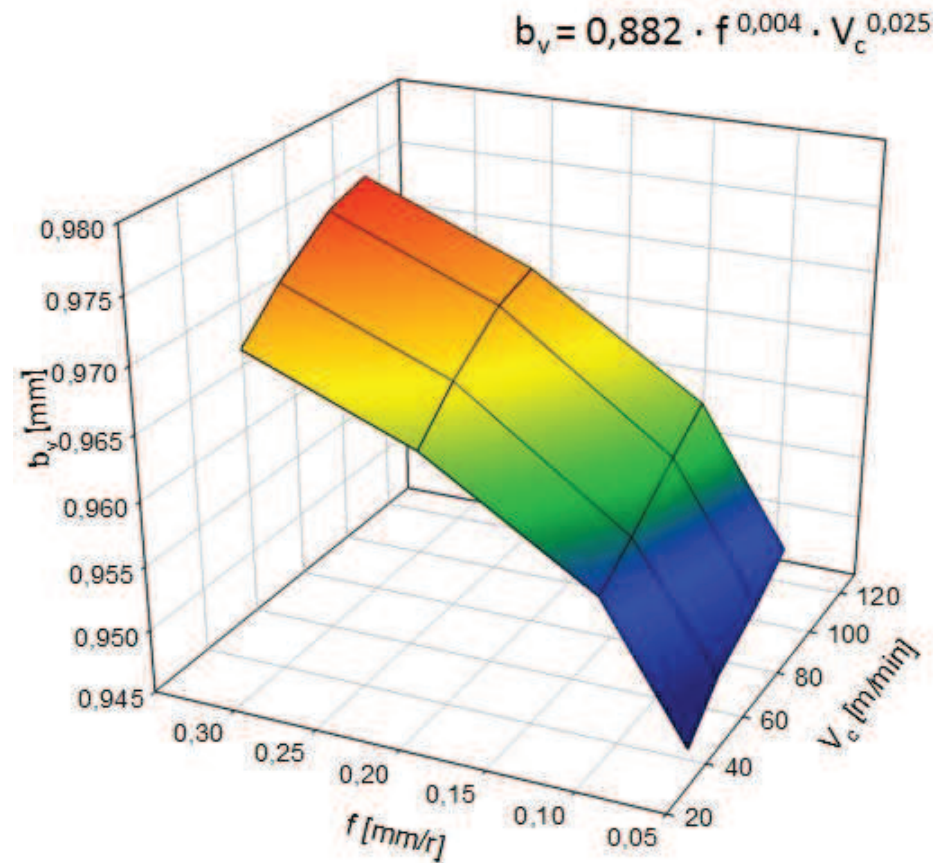


c) Representación de S respecto a  $f$ ,  $V_c$

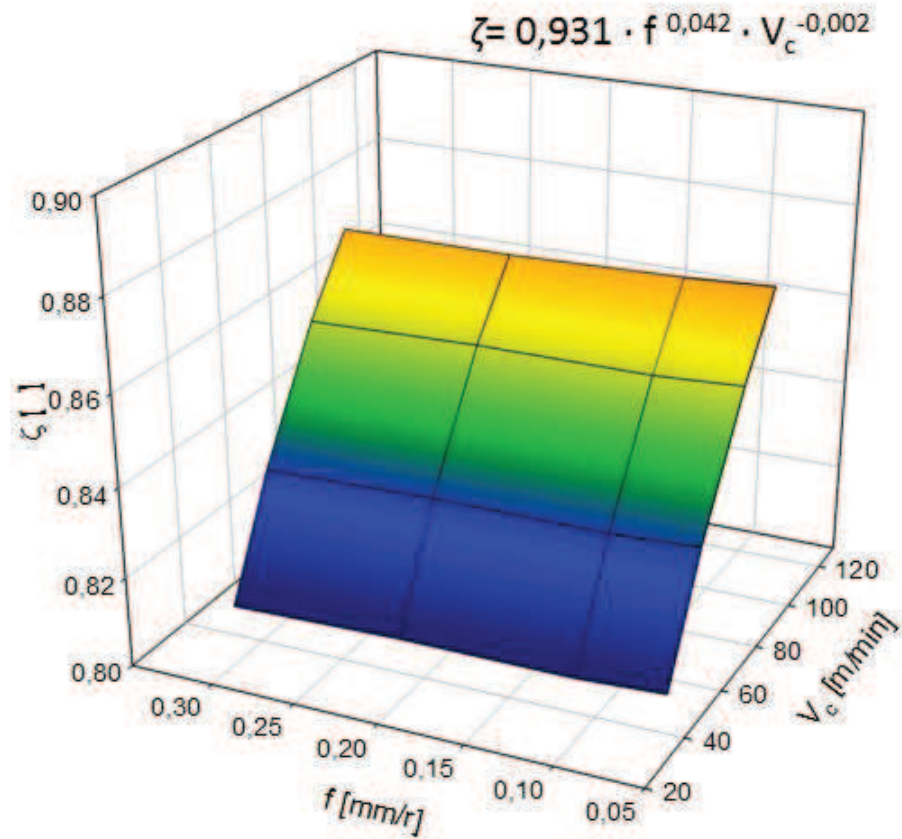


d) Representación de  $S_v$  respecto a  $f$ ,  $V_c$

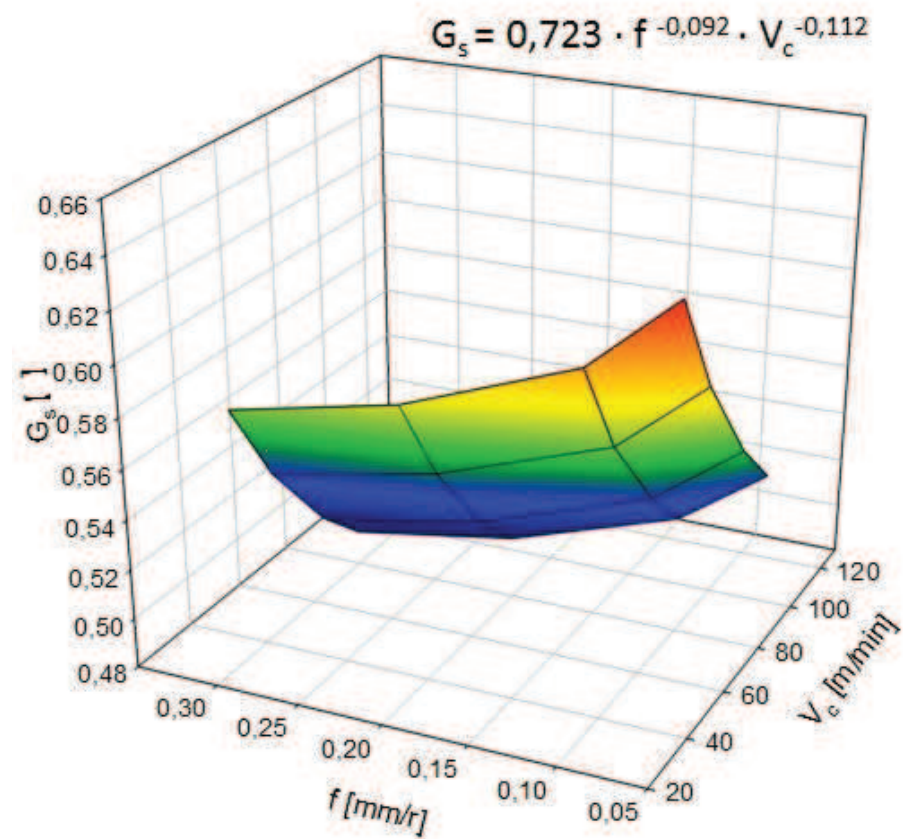
**Figura A.VIII.1** Modelos con ajuste relacionados con la viruta: a)  $h_c$ , b)  $h_v$ , c) S y d)  $S_v$  respecto a  $f$ ,  $V_c$ .

a) Representación de  $\phi$  respecto a  $f$ ,  $V_c$ b) Representación de  $b_v$  respecto a  $f$ ,  $V_c$



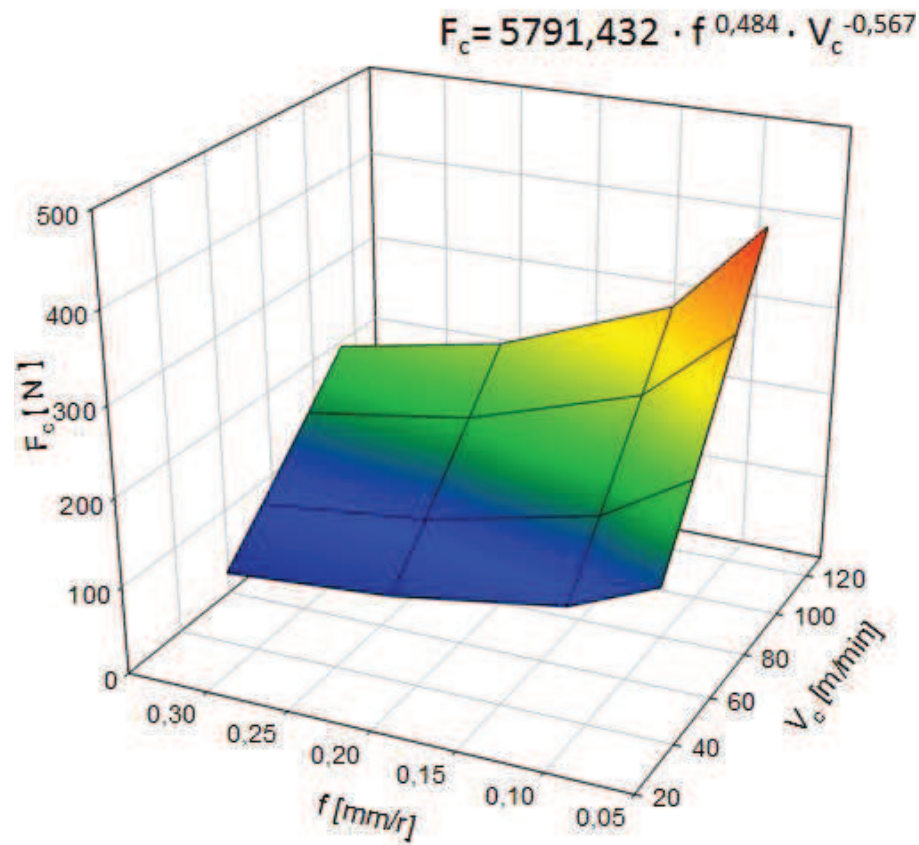
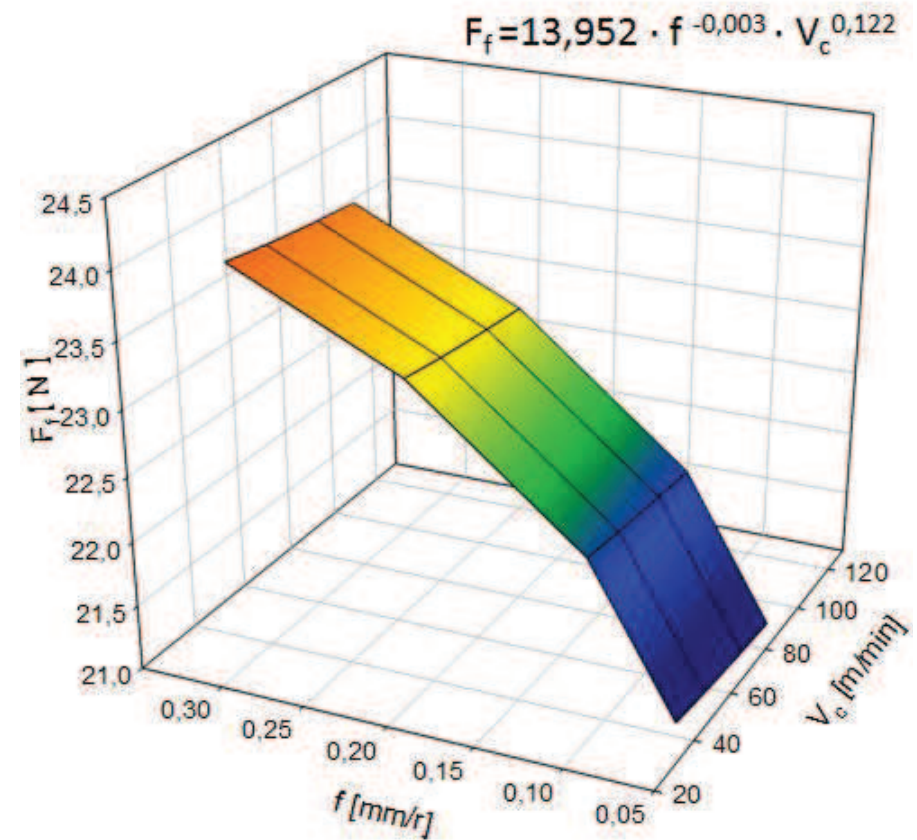


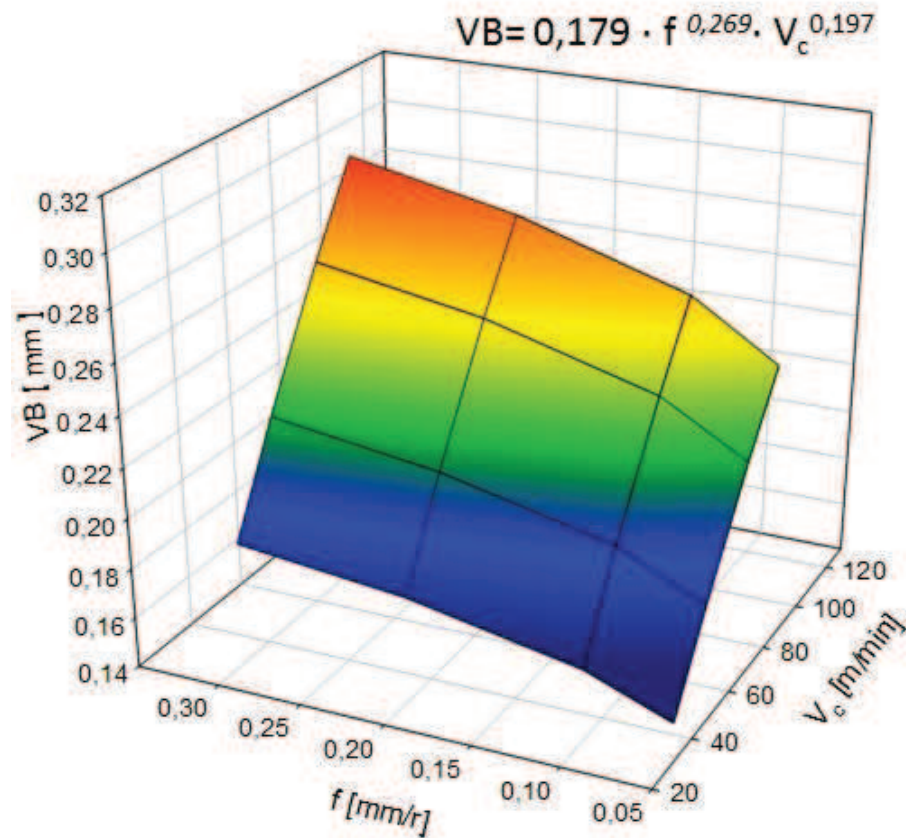
c) Representación de  $\zeta$  respecto a  $f$ ,  $V_c$



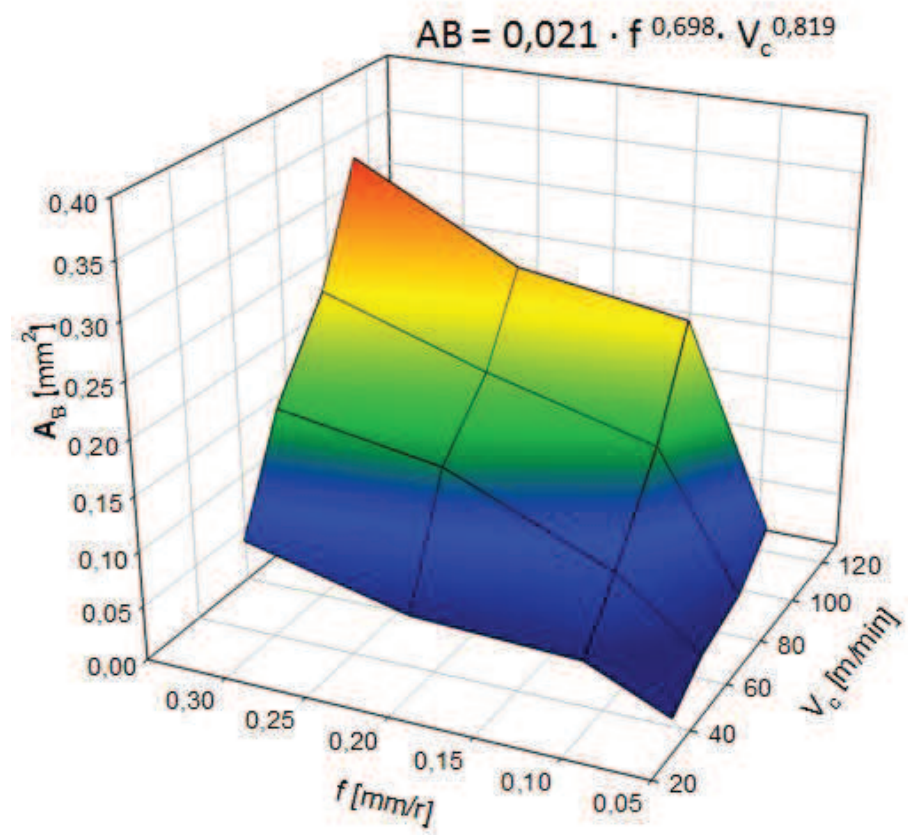
d) Representación de  $G_s$  respecto a  $f$ ,  $V_c$

**Figura A.VIII. 2** Modelos con ajuste relacionados con la viruta: a)  $\phi$ , b)  $b_v$ , c)  $\zeta$  y d)  $G_s$  respecto a  $f$ ,  $V_c$ .

a) Representación de  $F_c$  respecto a  $f$ ,  $V_c$ b) Representación de  $F_f$  respecto a  $f$ ,  $V_c$ **Figura A.VIII. 3** Modelos con ajuste relacionados con a)  $F_c$  y b)  $F_f$  para diversos rangos de  $f$  y  $V_c$ .



a) Tendencia de VB respecto a  $f$ ,  $V_c$



b) Tendencia de AB respecto a  $f$ ,  $V_c$

**Figura A.VIII. 4** Modelos con ajuste relacionados con el desgaste de la herramienta: a) VB y b) AB para diversos rangos de  $f$  y  $V_c$ .







# ANEXO IX

---

## PUBLICACIONES

*Metodología para la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras de  
uso aeronáutico a través del análisis de la viruta*

---



**Índice**

<b>A.IX.1 Técnicas Metalográficas para la Caracterización Morfológica de la Viruta en el Mecanizado de Aleaciones Ligeras de Uso Aeronáutico.....</b>	<b>A.IX.1</b>
<b>A.IX.2 Propuesta metodológica para la caracterización de la viruta en el torneado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V) .....</b>	<b>A.IX.2</b>
<b>A.IX.3 Study of the influence of the cutting parameters on the chip geometry during machining alloy UNS A97075 .....</b>	<b>A.IX.3</b>
<b>A.IX.4 Estudio experimental de las fuerzas de corte durante el mecanizado con aleaciones de titanio.....</b>	<b>A.IX.4</b>



### **A.IX.1 Técnicas Metalográficas para la Caracterización Morfológica de la Viruta en el Mecanizado de Aleaciones Ligeras de Uso Aeronáutico**





# TÉCNICAS METALOGRÁFICAS PARA LA CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA VIRUTA EN EL MECANIZADO DE ALEACIONES LIGERAS DE USO AERONÁUTICO

YEZIKA SÁNCHEZ, FRANCISCO JAVIER TRUJILLO,  
LORENZO SEVILLA (UNIVERSIDAD DE MÁLAGA)  
MOISÉS BATISTA, MARIANO MARCOS  
(UNIVERSIDAD DE CÁDIZ)

*En el siguiente artículo se realiza una propuesta metodológica para el análisis morfológico y geométrico de la viruta obtenida en el mecanizado en seco de aleaciones ligeras de uso aeronáutico a fin de mejorar el rendimiento de este tipo de operaciones de conformado, profundizando en el análisis de la influencia de los parámetros de corte sobre la tipología y geometría de la viruta obtenida, así como su repercusión sobre otras variables de salida del proceso. Este estudio ha sido particularizado para la aleación de Titanio UNS R56400 (Ti6Al4V), ampliamente utilizada en la fabricación de componentes estructurales para aeronaves. Para dicho análisis ha sido necesario recurrir a técnicas metalográficas y específicamente haciendo uso de la microscopía óptica. El empleo de estas técnicas permite realizar la medición de distintos parámetros geométricos característicos de la viruta. A partir del análisis y tratamiento de los resultados experimentales obtenidos se establece una serie de modelos paramétricos que permiten predecir el comportamiento de ciertos parámetros geométricos de la viruta de la aleación estudiada en función de los valores de los parámetros de corte aplicados, posibilitando seleccionar a priori los valores de entrada al proceso más adecuados a los objetivos perseguidos.*

La industria aeronáutica ha experimentado en las últimas décadas un desarrollo exponencial a nivel nacional, situándose España entre los principales países europeos tanto en nivel de producción como de generación de empleo. A pesar de esta buena situación, los continuos retos tecnológicos a los que se enfrenta esta industria, unidos a la fuerte competencia a nivel internacional, obligan al desarrollo

de nuevas estrategias que refuercen la competitividad de este sector. De este modo, uno de los factores claves radica en la mejora del rendimiento de los procesos de fabricación utilizados en esta industria, desde un punto de vista funcional, económico, energético y medioambiental.

Otro factor importante que se enfrenta el sector aeronáutico es la innovación en la fabricación de aeronaves más eficien-

tes, precisándose el desarrollo de nuevos materiales alternativos en los que destacan las aleaciones ligeras (de aluminio y titanio principalmente), debido a sus cualidades de baja densidad y excelentes propiedades mecánicas. Estas propiedades hacen que sean muy utilizadas en la fabricación de componentes estructurales para aeronaves. En su fabricación se suelen utilizar distintos procesos de conformado, siendo el mecanizado uno de los más empleados. El estudio y optimización de estos procesos suele ser complejo, dado el gran número de variables que intervienen. En este sentido, el análisis de la morfología de la viruta obtenida durante el mecanizado suele ser un factor de especial relevancia, dada su relación con otros factores que afectan de forma notable al rendimiento del proceso, como el desgaste de la herramienta de corte o la integridad superficial de la pieza mecanizada. Este análisis adquiere una mayor relevancia en procesos de mecanizado que utilizan técnicas con bajo impacto medioambiental, como es el caso del mecanizado en seco. Bajo estas condiciones, las temperaturas alcanzadas en la zona de corte son muy elevadas, dando lugar a fenómenos de incorporación de material mecanizado a la herramienta que alteran la morfología de la viruta y que a veces dificultan su evacuación. Por ello, la monitorización y control de la viruta es un aspecto a tener en cuenta en la mejora del rendimiento de los procesos de mecanizado. De este modo, se va a exponer una metodología para el análisis y la caracterización de la viruta en procesos de mecanizado en seco de aleaciones ligeras. La metodología diseñada se ha basado en el estudio de la viruta, y su relación con parámetros y variables de entrada y/o salida asociados a la misma y al proceso. Se ha tenido en cuenta tanto la monitorización online del proceso de formación de la viruta como la monitorización offline de distintos parámetros geométricos característicos (longitud, anchura, espesor, factor de recalcado, entre otros). Dada la dificultad que representa el estudio a simple vista de los parámetros geométricos que caracterizan a la viruta, ha sido necesario recurrir al uso de técnicas de microscopía óptica combinadas con técnicas metalográficas.

Finalmente, a partir de los resultados experimentales se han obtenido una serie de modelos paramétricos que permiten predecir el comportamiento de alguno de los parámetros geométricos de la viruta en función de las variables de entrada consideradas (velocidad de corte y avance). Estos modelos facilitan la selección de los valores de los parámetros de corte a aplicar, de forma que se consiga una mejora en el rendimiento del proceso.

## Metodología experimental

La metodología experimental fue diseñada de forma genérica con el propósito de ser utilizada como un modelo que permita conocer el comportamiento de distintas aleaciones ligeras durante el proceso de mecanizado a través del análisis de la viruta. Se pueden considerar las siguientes fases que la conforman (Figura 1), así como los recursos materiales e instrumentales empleados.

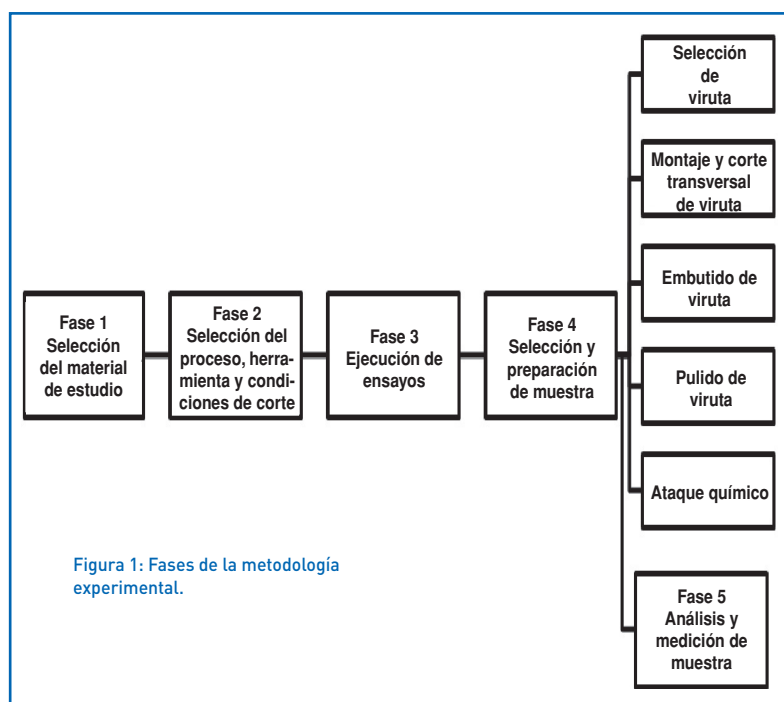


Figura 1: Fases de la metodología experimental.

Material	UNS R56400 (Ti6Al4V)						
Composición de la aleación (% en masa)	C	Fe	N	O	Al	V	Ti
	0,01	0,16	0,1	0,1	6,3	4,1	Resto
Dimensión (mm)	Ø60 mm x 150 mm						

Tabla 1. Composición de la aleación analizada y tamaño de las probetas utilizadas en los ensayos.

## Fase 1. Selección del material de estudio

La primera fase ha consistido en seleccionar una de las variables de entrada al proceso, la aleación objeto de estudio, así como la forma y dimensiones de las probetas a utilizar en los ensayos de mecanizado. Aunque esta metodología se ha diseñado para aplicarse a cualquier aleación ligera, se particulariza el estudio para la aleación de Titanio UNS R56400 (Ti6Al4V). Esta aleación se utiliza en la fabricación de componentes estructurales para aeronaves, frecuentemente de forma hibridada con materiales compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer), para formar estructuras laminadas metalo-compuestas (FML, Fiber Metal Laminates). Para este estudio se han utilizado probetas con forma cilíndricas, cuyas dimensiones y composición se muestran en la Tabla 1.





Figura 2: (a) Centro de mecanizado CNC Emco Turn 242; (b) Geometría de la herramienta de corte.

Variables de entrada. Equipamiento	Centro de mecanizado CNC EMCO Turn 242				
Refrigerante	Ausencia de fluidos de corte (en seco)				
V (m/min)	25	50	75	100	125
a (mm/r)	0.05	0.1	0.2	0.3	

Tabla 2.

### Fase 2. Selección del proceso, herramienta y condiciones de corte

El proceso de mecanizado seleccionado ha sido el cilindrado horizontal, por su sencillez de ejecución y baja complejidad geométrica. Con objeto de utilizar técnicas respetuosas con el medioambiente, los ensayos se realizaron en seco. Para ello se ha hecho uso de un centro de torneado CNC, modelo Emco Turn 242, Figura 2(a). Con el objetivo de analizar la influencia de la velocidad de corte ( $v$ ) y el avance ( $a$ ) sobre la morfología de la viruta y sus características geométricas, se ha procedido a la realización de distintos ensayos con diversos valores de  $v$  y  $a$ , Tabla 2. Se trata de valores habitualmente utilizados en el mecanizado de este tipo de aleaciones en aplicaciones aeronáuticas. La profundidad de corte ( $p$ ) se mantuvo constante, tomando un valor de 1 mm. Todos los ensayos se ejecutaron para un tiempo de mecanizado de  $t = 10$  s.

Como herramientas de corte se emplearon plaquitas de Carburo de Wolframio (WC-Co) sin recubrimiento, con referencia DCMT11T308-F2HX, cuya geometría se muestra en la Figura 2(b). Para cada ensayo se utilizó un filo nuevo, con el objetivo de mantener las mismas condiciones iniciales en todos ellos.

### Fase 3. Ejecución de los ensayos de mecanizado

Una vez seleccionadas las variables de entrada al proceso, se procedió a la ejecución de los ensayos de mecanizado. La combinación de los distintos valores de  $v$  y  $a$  seleccionados dio lugar a una resultante de 20 ensayos posibles. Los ensayos de mecanizado fueron grabados en vídeo, con el objetivo de registrar la forma en la que la viruta se desprende de la zona de corte, así como cualquier tipo de incidencia. Una vez finalizado el proceso de corte, se procedió a recoger la viruta generada y a etiquetarla mediante un código identificativo, —siguiendo metodologías aplicadas en otros estudios— código recoge la información relativa a los valores de los parámetros de corte empleados y del filo y la herramienta utilizada en el ensayo. Tras el etiquetado, los fragmentos de viruta de cada ensayo fueron clasificados según su morfología, aplicando los criterios establecidos en la norma ISO 3685.

### Fase 4. Selección y preparación de la muestra

Tras finalizar los ensayos de mecanizado, se procedió a la elaboración de probetas metalográficas para facilitar la manipulación de la viruta, y proceder a su observación haciendo uso de técnicas de microscopía óptica. Con ello se pretende comprender su mecanismo de formación y su comportamiento durante el proceso de corte. Se aplica una serie de procedimientos normalizados en la rama de ciencias de materiales, con la finalidad de comprobar las características y propiedades de la muestra o posibles fallas efectuadas por el proceso. Es importante resaltar que el éxito en esta etapa depende, en gran medida, del método utilizado en la preparación de la muestra así como del equipamiento básico para realizarlo. Se consideraron los siguientes pasos para preparar las muestras metalográficas de la viruta:

- Selección de viruta
- Corte transversal de viruta
- Inclusión de viruta
- Esmerilado y pulido de probeta metalúrgica
- Ataque químico
- Medición y análisis de viruta

El proceso de selección de muestra es un paso importante, ya que debe satisfacer las condiciones de estadísticas en una sección limitada de forma aleatoria. En este caso se recomienda seleccionar diversos fragmentos de viruta previamente identificados de acuerdo a los parámetros en las que fueron expuestas, Figura 4.

Una vez identificada la viruta con respecto a su proceso, se realizó un corte transversal a los fragmentos de viruta, Figura 5(a). El corte se realizó de forma manual (evitando el calentamiento de la muestra), permitiendo obtener la homogeneidad del material durante el proceso de fabricación en la que fue ejecutada.

Posteriormente, se llevó a cabo la inclusión de la viruta, con el objetivo facilitar un mecanismo que permita manipularla y visualizar sus características geométricas. Para ello se procedió al montaje de viruta (inclusión) en una probeta de resina 20x20x10 mm, haciendo uso de resina termoplástica de monje en caliente, con nombre comercial ClaroFast de la marca Struers, adecuada para el análisis del material a estudiar. Para el montaje de la viruta fue necesario realizar previamente un molde de plástico (resina), Figura 5(b). Posteriormente se aplicaron presión y calor para lograr suavizar y densificar el plástico. Los parámetros utilizados en su fabricación, en base a las recomendaciones del proveedor de resina, fueron los siguientes: Fuerza 35 N, tiempo de calentamiento 7 min, tiempo de enfriamiento 8 min, temperatura constante a 180 °C (para una proporción equivalente a 25 ml de resina). Una vez realizada la probeta base, se adhirieron los fragmentos de viruta y se procedió a colocar la probeta en la embutidora. Esta operación se repitió bajo los siguientes parámetros: 10 ml de resina sobre la probeta con viruta, reducir el tiempo de calentamiento y enfriamiento a un 10% de los parámetros propuestos con anterioridad.

Finalizado el montaje de la viruta se procedió al desbaste y acabado. Para ello se hizo uso de una pulidora modelo Tegrasystem, Figura 6(a), con el objetivo de obtener una superficie ideal y libre de toda huella de marcas de herramientas, brindando un aspecto de la superficie igual al de un espejo. Para lograr dicho objetivo fue necesario realizar un desbaste agresivo para eliminar material excedente de la probeta, utilizando un disco abrasivo MD-Primo 320 con H2O, a una velocidad de 150 rpm, tiempo de 5 min y fuerza



Figura 3: (a) Selección de la muestra; (b) Corte de fragmentos de viruta; (c) Inclusión de viruta; (d) Esmerilado y pulido; (e) Ataque químico; (f) Observación al microscopio óptico- medición y análisis de viruta.



Figura 4: Selección de la muestra- fragmentos de viruta.



Figura 5: (a) Selección de fragmentos de viruta (Corte transversal); (b) Inclusión de fragmentos de viruta.





# Vallcal, s.l.

SUMINISTROS INDUSTRIALES

**EL SER HUMANO  
IDEA LA FORMA  
DE VOLAR,  
NOSOTROS LO  
HACEMOS  
POSIBLE**



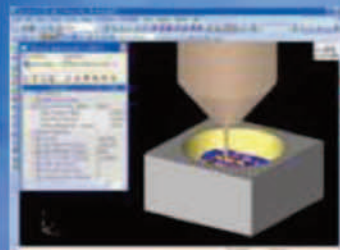
## NORMALIZADO Y PULIDO

PARA TODO TIPO DE TROQUELES Y MATRICES  
STOCK PARA REDUCIR EL TIEMPO DE ENTREGA  
SOLUCIONES DE AVANZADA TECNOLOGÍA  
DESARROLLO DE SOLUCIONES



## DISEÑO CAD-CAM

AMPLIA EXPERIENCIA EN EL MUNDO DEL  
DISEÑO POR ORDENADOR OFRECIENDO AL  
CLIENTE SOLUCIONES ADAPTADAS A SUS  
NECESIDADES



## MAQUINA/HERRAMIENTA

MAS DE 20 AÑOS DE EXPERIENCIA EN LA  
VENTA DE MAQUINAS CNC PARA EL  
MECANIZADO DE PRECISION. (FRESADORAS,  
CENTROS DE MECANIZADO, RECTIFICADORAS,  
ELECTROEROSIÓN, ETC)



## METROLOGIA

TODO TIPO DE SOLUCIONES PARA CONSEGUIR  
LA MAXIMA PRECISIÓN Y CALIDAD EN LOS  
TRABAJOS REALIZADOS.  
(MAQUINAS TRIDIMENSIONALES, COLUMNAS  
DE MEDICIÓN Y APARATOS DE MEDIDA)



## HERRAMIENTA DE CORTE

OFRECEMOS A NUESTROS CLIENTES  
HERAMIENTA DE CORTE ESPECIFICAS PARA LOS  
DIFERENTES TRABAJOS A REALIZAR EN LOS  
MECANIZADOS EN FIBRA DE CARBONO Y  
TITANIO



## SAT

SERVICIO DE ASISTENCIA TECNICA A NUESTROS  
CLIENTES EN UN TIEMPO MAX. DE 48 h.  
ASISTENCIA DE REPUESTOS Y EQUIPOS DE  
VERIFICACIÓN.



**P.I VILLALONQUEJAR – C/ MERINDAD DE SOTOSCUEVA, 10 – 09001 BURGOS (ESPAÑA)**

TFNO. (34) 947-484 198 / FAX. (34) 947-486 066 E-mail: [vallcal@vallcal.com](mailto:vallcal@vallcal.com)

[www.vallcal.com](http://www.vallcal.com)





Figura 6: (a) Desbaste de probeta; (b) Consumibles para el desbaste de probeta.

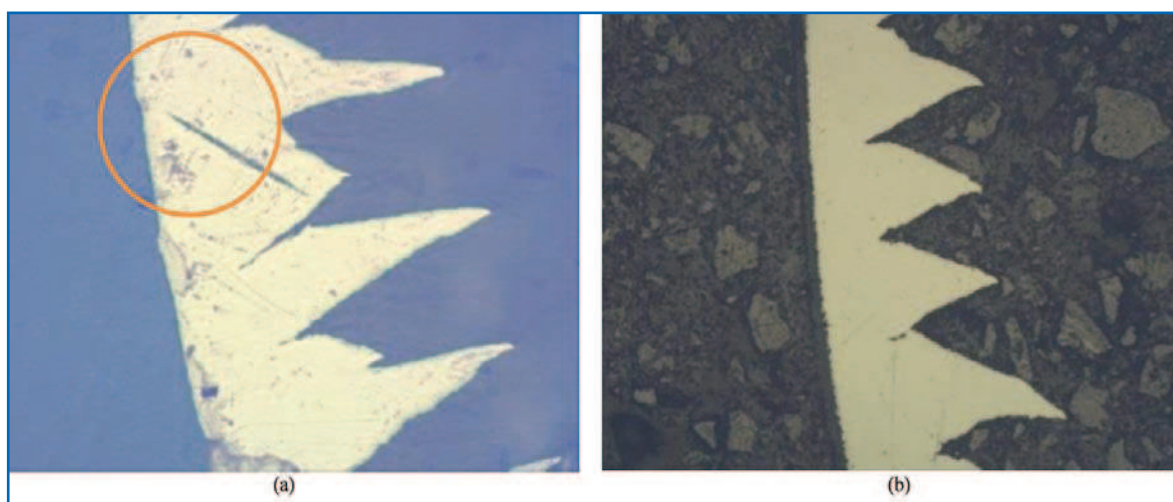


Figura 7: Comparación de muestras; (a) pulido incompleto; (b) Pulido correcto.

de 30 N. Para un desbaste medio fue necesario utilizar un disco MD-Largo a una velocidad 150 rpm, con un tiempo de 7 min y fuerza de 30 N. Para el acabado final se utilizó un disco MD-DAC a una velocidad de 150 rpm a un tiempo de 3 min aplicando una fuerza de 25 N. La selección del abrasivo se realizó teniendo en cuenta el material a pulir y el propósito del estudio metalográfico, Figura 6(b).

Una vez finalizado el pulido se realizó un enjuague general a la probeta con agua destilada y secado con aire comprimido, con el fin de eliminar impurezas en la probeta. A continuación, se procede a realizar una inspección previa a la superficie de estudio antes de realizar el ataque químico. En el caso de que el resultado no sea el deseado, es posible realizar un desbaste fino adicional para mejorar el acabado de la probeta. En la Figura 7 se puede observar la diferencia entre una superficie con un pulido incorrecto, Figura 7(a) y correcto Figura 7(b).

Tras el pulido, se procedió al ataque químico de las probetas haciendo uso de un reactivo adecuado al material objeto de estudio. Este ataque químico permite revelar la microestructura del material a estudiar. La preparación del reactivo se realizó bajo los siguientes parámetros: 100 ml de  $H_2O$ , 1-3 ml de Ácido fluorhídrico (HF) y 2-6 ml de Ácido nítrico ( $HNO_3$ ). Para su preparación se utilizó una bureta de vidrio, 2 vasos precipitados de plástico (uno para colocar el reactivo

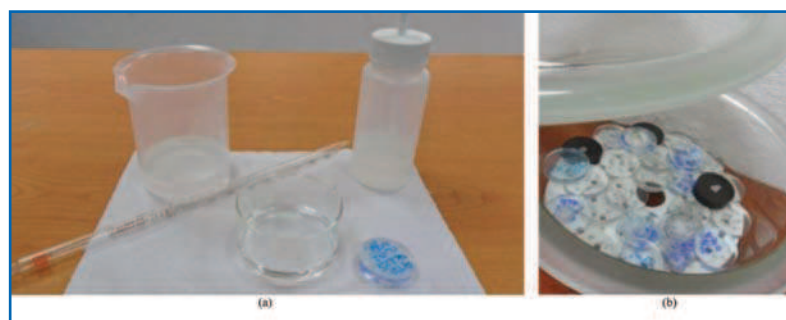


Figura 8: (a) Material utilizado para el ataque químico; (b)Resguardo de probetas.

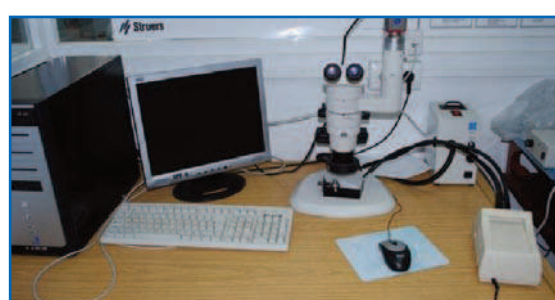


Figura 9: Microscopio estereoscópico modelo Nikon modelo SMZ 2T.



Figura 10: Imagen SOM (20X y 1X) de la viruta y parámetros geométricos controlados.

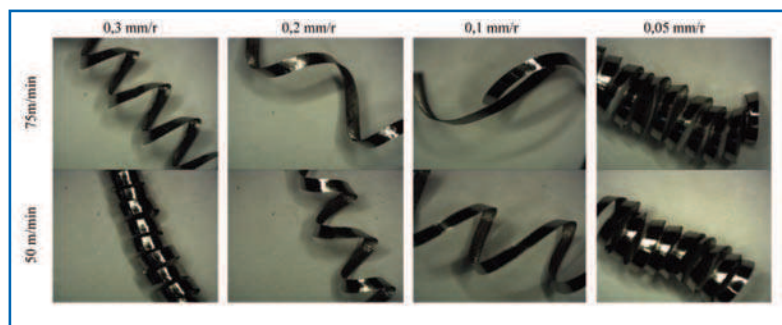
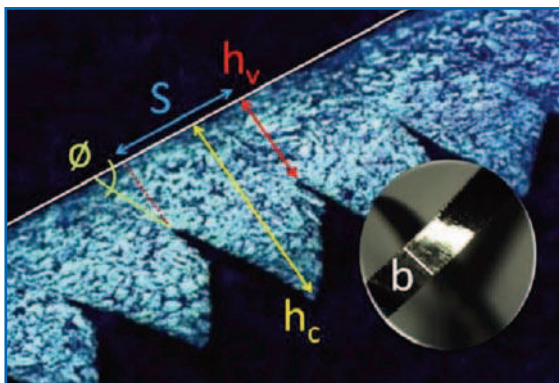


Figura 11: Selección de viruta por cada ensayo realizado (1x).

y el otro para agua destilada). El tiempo empleado para el ataque químico fue de 15 segundos de exposición al reactivo, Figura 8 (a). Una vez pasado el tiempo estipulado se realizó un lavado con agua destilada con su respectivo secado. Para el almacenaje de las probetas se utilizó un desecador, con el fin de mantener una atmosfera interna libre de humedad, Figura 8(b).

### Fase 5. Selección Análisis y medición de muestra

Una vez preparadas las probetas se procedió a su observación mediante el uso de técnicas de Microscopía Óptica Estereoscópica (SOM, Stereoscopic Optical Microscopy). Para ello se utilizó un microscopio estereoscópico modelo Nikon modelo SMZ 2T con un máximo de 63X, con cámara Kappa Image Base mod. CF11 DSP, tarjeta capturadora PCI

SC module, con fuente emisora de luz Intralux 400 marca Volpi, con adaptadores para emisión anular y dos focos puntuales de fibra óptica, Figura 9.

La captura de imagen y las mediciones se realizaron haciendo uso del software Kappa Image Base-Control y Perfect Image V7. Una vez obtenida la imagen se procedió al trazado de una serie de líneas tangenciales sobre la zona de interés de la viruta, las cuales facilitaron la monitorización offline y la medida de los parámetros geométricos característicos de la viruta. En la Figura 10 se muestran los parámetros objeto de medición, donde  $h_c$  es la altura de cresta,  $h_v$  la altura de valle,  $S$  la sección de viruta,  $\phi$  el ángulo de deslizamiento o cizalla y  $b$  el ancho de la viruta. Los valores de estos parámetros se han obtenido como el valor medio de las mediciones realizadas en distintos puntos de la viruta. A partir de estos parámetros se han obtenido de forma indirecta otros parámetros geométricos de interés, como el espesor de la viruta ( $t_c$ ), o el factor de recalcado ( $\xi$ ).

### Resultados

Una vez finalizada la monitorización offline, se procedió al tratamiento, análisis e interpretación de los resultados experimentales obtenidos. En la Figura 11 se muestra una comparativa macroscópica de la morfología de la viruta adquirida a ciertas velocidades de corte: 75 y 50 m/min en función a los valores de  $a$  aplicados. En ellas se pueden apreciar diferentes efectos en su forma, teniendo en cuenta los criterios de clasificación de la morfología de la viruta de la norma ISO 3685 se puede decir que la tipología de viruta obtenida es, en general, de tipo helicoidal cónica enredada. En la Figura 11 se puede observar la evolución geométrica de la viruta a distintas  $v$ , estando asociada al incremento del avance. Se puede apreciar que la alta plasticidad de esta aleación da lugar a que la viruta se deforme plásticamente sin llegar a fragmentarse, obteniéndose una viruta continua con elevada tendencia a formar nidos de viruta que dificultan la evacuación de la misma de la zona de corte. Se observa además una escasa influencia del valor de  $v$  en dicha morfología, siendo algo mayor la influencia de  $a$ . Continuando con la evaluación, se observa cómo, debido al bajo módulo elástico de la aleación, se origina una deformación de la viruta por su plano de deslizamiento, dando lugar una viruta de tipo segmentada.

Así, para valores de  $a$  de 0,3 mm/r a  $v$  de 50 m/min —como es el caso— la viruta obtenida es de tipo helicoidal cónica corta, presentando una menor tendencia a formar nidos de viruta. Todo parece indicar que los mayores esfuerzos originados a altos avances y bajas velocidades de corte dan lugar a que se supere el límite de rotura del material, existiendo una mayor tendencia a la fragmentación. Sin embargo al incrementar su  $v$ , como es el caso a  $v$  75 m/min, se logra distinguir un cambio significativo, dado que aumenta el espesor de la viruta y por lo tanto se vuelve más rígida, por lo que las fuerzas necesarias para originar su corte deberán ser altas, debido a su baja deformación. Por consiguiente podría afectar la vida útil de la herramienta.



# FANUC

## Todo gira alrededor de su productividad.

Con 55 años de experiencia, 2,4 millones de instalaciones y un 65% de la cuota de mercado mundial, somos claramente el N°1 en automatización industrial. Nuestro nuevo CNC de altas prestaciones 30i-B es la solución para el mecanizado complejo de 5 ejes.

FANUC, la más alta precisión y fiabilidad junto con un equipo de servicio y asesoramiento totalmente dedicado.

## Tecnología de 5 ejes

# ¡Desafíenos!



[WWW.FANUC.EU](http://WWW.FANUC.EU)





Figura 12: Evaluación macroscópica (1X).

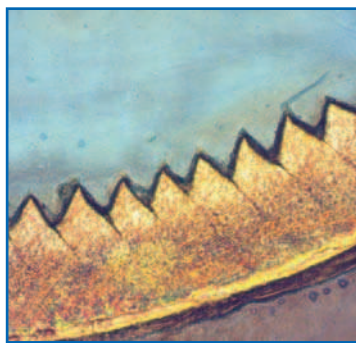


Figura 13: Representación gráfica sobre la sección de viruta (20X).

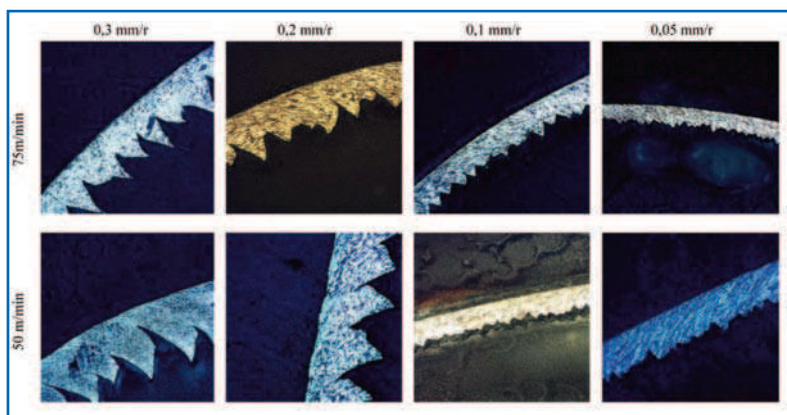
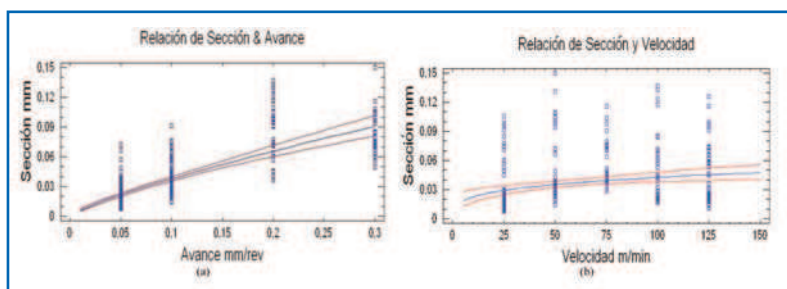


Figura 14: Fragmentos de viruta con ataque químico (20x).

Figura 15: Modelo ajustable en sección de viruta con respecto a valores de  $v$  y  $a$ .

## Conclusiones

Una vez finalizado la experimentación y análisis de los datos obtenidos de ellos es posible extraer las siguientes conclusiones:

- Se propone una metodología experimental para la caracterización morfológica y geométrica de la viruta en procesos de torneado en seco de aleaciones ligeras de uso aeronáutico, particularizado el estudio para la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V), teniendo en cuenta su relación con parámetros y variables de entrada y/o salida asociados a la misma y al proceso.
- Se ha analizado y considerado el uso de técnicas metalográficas como instrumento fundamental para la caracterización de la viruta en el proceso de torneado, en particular bajo la ejecución de ensayos con microscopía óptica, así como los recursos materiales e instrumentales empleados.
- Se logra determinar que, para la aleación estudiada, el análisis de la viruta manifiesta que el avance es uno de los parámetros de mayor influencia en el proceso de corte, cuya combinación con altos valores de velocidad de corte puede lograr el incremento en la sección de la viruta y, por tanto, mayor uso energético requerido para corte.
- La metodología propuesta puede ser aplicada para el análisis de otros materiales metálicos, adaptando ciertos aspectos a las características propias de la viruta obtenida en el mecanizado de esas aleaciones.

En la Figura 12 se puede observar la presencia de brillo en la superficie exterior de la viruta -la cara de contacto con la herramienta-, lo cual es debido a la carga de tensión que sufre en la zona de corte, sin embargo en la cara interior se puede identificar el efecto de sierra, característica de la viruta de titanio, debido a su compresión durante el proceso. Esto se puede observar con detalle durante el estudio SOM. Para lograr la caracterización de la morfología de la viruta en el proceso de corte es necesario recurrir a una evaluación más detallada, justificando el uso de técnicas microscópicas en el área trasversal de la viruta. Con ellas se puede observar con claridad la formación del efecto diates de sierra en la viruta, así como también la segmentación de ella, que aumenta de forma significativa frente al valor de  $a$  y de forma leve con el valor de  $v$  (Figura 13). El comportamiento de este efecto es el resultado obtenido de las diferencias de altura entre las crestas y los valles, presentando una mayor tendencia a la fragmentación. Por lo tanto, la sección de la viruta está directamente relacionada con el comportamiento del material.

Considerando lo anterior, se observa que la viruta de titanio tiende a incrementar su espesor conforme avanza en su mecanizado. De igual forma, se puede decir que para  $v = 75$  m/min se encuentra el valor más favorable desde el punto de vista de la fuerza de corte necesaria, con independencia del valor de  $a$  aplicado.

En la figura 14 se identifican imágenes SOM a distintas  $v$ , logrando identificar que el  $a$  es el parámetro de mayor influencia en la segmentación de la viruta, visualizados durante el incremento de alturas entre la cresta y sus valles. Por lo tanto, si aumenta su sección respecto al  $a$ , podría afectar a la calidad superficial de la superficie mecanizada. Finalmente, a partir de los datos obtenidos experimentalmente, se ha procedido a la obtención de un modelo paramétrico que permita predecir el valor de  $S$  en función de  $v$  y  $a$ , visualizados en la Figura 15. Para ello se ha procedido a realizar un ajuste con distintos modelos, siendo el modelo potencial el que ha dado lugar a un mejor resultado.

Considerando  $K$ ,  $x$  e  $y$  como parámetros de ajuste, se puede observar que el valor del exponente para  $a$  es superior al exponencial asignado como  $v$ , lo cual significa que la sección de la viruta se ve notablemente influenciada por el  $a$  y levemente con  $v$ .

En la Figura 15 (a) se pueden comprobar las teorías expuestas en los párrafos anteriores, donde la sección de la viruta tiende a incrementarse conforme avanza el corte. A su vez se observa que efectivamente el parámetro de la  $v$  tiene poca influencia en ella, ya que su afectación es ligeramente significativa en comparativa a su  $a$ , Figura 15(b). Es importante indicar que los límites de confianza utilizados para este modelo fueron a un 95%. /



## **A.IX.2 Propuesta metodológica para la caracterización de la viruta en el torneado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V)**



## Propuesta metodológica para la caracterización de la viruta en el torneado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V)

Y. Sánchez Hernández<sup>1</sup>, L. Sevilla Hurtado<sup>1</sup>, F.J. Trujillo Vilches<sup>1</sup>, M. Batista Ponce<sup>2</sup>,  
M. Marcos Bárcena<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dpto. de Ingeniería Civil de Materiales y Fabricación. Universidad de Málaga. Yezika.Sanchez@uma.es

<sup>2</sup>Dpto. de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad de Cádiz. moises.batista@uca.es

**Palabras clave:** torneado, viruta, R56400, factor de recalcado

El conformado de componentes mecánicos fabricados en aleaciones ligeras ha adquirido en los últimos años un renovado interés debido a su aplicación formando estructuras híbridas con otros materiales en zonas estratégicas de elementos estructurales de vehículos de transporte [1] -especialmente aeronaves- a los que se les requiere una alta resistencia mecánica con un peso muy reducido y elevada compatibilidad electroquímica. Este es el caso particular de las estructuras laminadas metalo-compuestas (FML, Fiber Metal Laminates) de aleaciones de titanio y materiales compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP/Ti). El montaje en las estructuras de las aeronaves de estos elementos se suele hacer mediante procesos basados en tecnologías de unión mecánicas las cuales requieren previamente procesos de taladrado de los FML. La optimización de estos procesos obliga a considerar el empleo de técnicas de taladrado en un solo paso (OSD, One Shot Drilling) en los que exista un compromiso entre los parámetros más adecuados para el taladrado del CFRP y de la aleación de Ti [2].

En las condiciones de taladrado OSD con CFRP/Ti, uno de los factores críticos que condicionan el proceso es la necesidad de efectuar el mismo en ausencia de fluidos de corte para evitar la formación de obstáculos por compactación del polvo de fibra en los canales de evacuación de la viruta y mejorar el rendimiento medioambiental. En estas condiciones, la propia generación de la viruta de la aleación de Ti se convierte en un factor de especial relevancia, dado que las temperaturas que se producen en la zona de corte afectan de forma notable a la misma y su evacuación puede verse dificultada por la aparición de fenómenos de incorporación de material de la aleación a las caras de desprendimiento e incidencia. Todo lo anterior sugiere disponer de un estudio detallado del proceso de formación de la viruta en el mecanizado de este tipo de aleaciones lo cual, por una parte reforzaría el conocimiento básico del proceso de mecanizado de las mismas en ausencia de fluidos de corte y, por otra, permitiría seleccionar las condiciones más adecuadas de trabajo. Con objeto de evitar los factores relacionados con la propia geometría de los procesos de taladrado, una primera etapa de este estudio conllevaría el análisis de la viruta en procesos de mecanizado de baja complejidad geométrica. De acuerdo con todo lo anterior, en este trabajo se lleva a cabo una propuesta metodológica para la caracterización y análisis de la viruta en procesos de torneado horizontal en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V), ampliamente empleada en la industria aeronáutica. Sobre la base de los resultados derivados de su aplicación se han definido los principales parámetros y variables que configuran la caracterización de la misma.

La Metodología diseñada se ha fundamentado en el estudio de la viruta, y su relación con parámetros y variables de entrada y/o salida asociados a la misma y al proceso, durante la realización de ensayos de cilindrado en seco de la aleación Ti6Al4V con velocidades de corte y avances variables. En la misma, se ha diferenciado el seguimiento de la formación de la viruta (monitorización ON-LINE) y de otros parámetros geométricos de la misma (monitorización OFF-LINE). En particular se ha prestado especial atención a la evaluación del factor de recalcado desde parámetros dimensionales (longitud, anchura y espesor de la viruta) y desde variables geométricas (ángulo de desprendimiento y ángulo de cizalladura). Los resultados obtenidos han permitido validar esta metodología.

### REFERENCIAS

- [1] EREA, T. a. (2010). From Air Transport System 2050 vision to planning for research and innovation. Amsterdam: EREA.
- [2] B. Denkena, P. H. Efficient Production of CFRP Lightweight Structures on the Basis of Manufacturing Considerations at an Early Design Stage. New Production Technologies in Aerospace Industry. Springer International Publishing, ( 2013),131-136.





# Propuesta metodológica para la caracterización de la viruta en el torneado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V)

Y. Sánchez Hernández<sup>1</sup>, L. Sevilla Hurtado<sup>2</sup>, F. J. Trujillo Vilches<sup>3</sup>, M. Marcos Bárcena<sup>4</sup>,  
M. Batista Ponce<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dpto. de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación. Universidad de Málaga. Yezika.Sanchez@uma.es

<sup>2</sup>Dpto. de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación. Universidad de Málaga. trujillov@uma.es

<sup>3</sup>Dpto. de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación. Universidad de Málaga. lsevilla@uma.es

<sup>4</sup>Dpto. de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad Cádiz. mariano.marcos@uca.es

<sup>5</sup>Dpto. de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad Cádiz. mbatista@uca.es

---

*En el presente trabajo se expone la Metodología seguida para la caracterización y análisis de la viruta en procesos de mecanizado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V), muy utilizada de forma híbrida con otros materiales compuestos para la fabricación de componentes estructurales en aeronaves. La Metodología diseñada se ha fundamentado en el estudio de la viruta y su relación con parámetros tecnológicos de corte y las variables de entrada y/o salida asociados al proceso, utilizando velocidades de corte y avances variables. Se ha diferenciado el seguimiento de la formación de la viruta y su morfología (monitorización ON-LINE) y otros parámetros geométricos de la misma (monitorización OFF-LINE). En particular, se presentan los resultados obtenidos en la evaluación del factor de recalcado a partir de la medición del ángulo de deslizamiento, así como de su evolución en función de la velocidad de corte y del avance. Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto una influencia mucho menor de la velocidad de corte sobre el factor de recalcado que el que presenta el avance. Finalmente, a partir de los datos experimentales se ha obtenido un modelo paramétrico que permite predecir el valor del factor de recalcado en función de los valores de los parámetros de corte aplicados.*

---

## 1. Introducción

El conformado de componentes mecánicos fabricados con aleaciones ligeras ha adquirido en los últimos años un renovado interés debido a su aplicación, formando estructuras híbridas con otros materiales, en zonas estratégicas de elementos estructurales de vehículos de transporte [1,2] -especialmente aeronaves- a los que se les requiere una alta resistencia mecánica, un peso muy reducido y una elevada compatibilidad electroquímica. Este es el caso particular de las estructuras laminadas metalo-compuestas (FML, Fiber Metal Laminates) de aleaciones de titanio y materiales compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP/Ti). El montaje en las estructuras de las aeronaves de estos elementos se suele hacer mediante procesos basados en tecnologías de unión mecánicas que requieren previamente procesos de taladrado de los FML [3]. La mejora del rendimiento de estos procesos obliga a considerar el empleo de técnicas de taladrado en un solo paso (OSD, One Shot Drilling) en los que exista un compromiso entre los parámetros más adecuados para el taladrado del CFRP y de la aleación de Ti [4].

En las condiciones de taladrado OSD con CFRP/Ti uno de los factores críticos que condicionan el proceso es la necesidad de efectuar el mismo en ausencia de fluidos de corte. Con ello se pretende, por un lado, evitar la formación de obstáculos por compactación del polvo de fibra en los canales de evacuación de la viruta [5]. Por otro, se pretende utilizar técnicas de fabricación sostenible [6], mediante la supresión del uso de sustancias con negativo impacto ambiental y cuyo reciclado supone un incremento en los costes de fabricación [7]. Bajo estas condiciones -en seco- la propia generación de la viruta de la aleación de Ti se convierte en un factor de especial relevancia, dado que las temperaturas que se producen en la zona de corte afectan de forma notable a la misma y su evacuación puede verse dificultada por la aparición de fenómenos de incorporación de material de la aleación a las caras de desprendimiento e incidencia de la herramienta de corte [8].

La morfología de la viruta puede relacionarse con el desgaste de la herramienta y la integridad superficial de la pieza mecanizada, influyendo en su precisión dimensional y a la continuidad del proceso, por lo que puede ser utilizada como un indicador factible que permite conocer las condiciones de mecanizado [9-11]. Por ello, la monitorización y control de la viruta es un aspecto a tener en cuenta en la mejora del rendimiento de los procesos

de mecanizado [12]. Dicha morfología depende fundamentalmente de los parámetros de corte (velocidad de corte, avance y profundidad de corte), de la geometría de la herramienta y su posición relativa con respecto a la pieza, y de las propiedades del material a mecanizar [13].

Todo lo anterior sugiere disponer de un estudio detallado del proceso de formación de la viruta en el mecanizado de este tipo de aleaciones que, por una parte, reforzaría el conocimiento básico del proceso de mecanizado de las mismas en ausencia de fluidos de corte y, por otra, permitiría seleccionar las condiciones más adecuadas de trabajo. Por otro lado, hay que tener en cuenta que el gran número de variables que intervienen en los procesos de mecanizado hace que su estudio sea complejo [14]. De este modo, la utilización de métodos analíticos suele entrañar una elevada dificultad, por lo que habitualmente se suele recurrir a simplificaciones que dan lugar a resultados que se alejan del comportamiento real del proceso. Por ello, en la medida de lo posible es preciso recurrir a la utilización de métodos basados en la experimentación, cuyos resultados suelen ajustarse en mayor medida a la realidad del proceso estudiado.

De acuerdo con todo lo anterior, en este trabajo se realiza una propuesta metodológica para la caracterización y análisis de la viruta en procesos de mecanizado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V), ampliamente empleada en la industria aeronáutica de forma híbrida, tal y como se ha indicado previamente. Con objeto de evitar los factores relacionados con la propia geometría de los procesos de taladrado, una primera etapa de este estudio conllevaría el análisis de la viruta en procesos de mecanizado de menor complejidad geométrica, como es el caso del torneado horizontal.

La Metodología diseñada se ha fundamentado en el estudio de la viruta, y su relación con parámetros y variables de entrada y/o salida asociados a la misma y al proceso, utilizando velocidades de corte y avances variables. En la misma, se ha diferenciado el seguimiento de la formación de la viruta (monitorización ON-LINE) y de otros parámetros geométricos de la misma (monitorización OFF-LINE). En particular se ha prestado especial atención a la evaluación del factor de recalcado a partir de diferentes parámetros dimensionales (longitud, anchura, y espesor de la viruta) y geométricos (ángulo de deslizamiento) [15].

Finalmente, a partir de los resultados experimentales se han obtenido una serie de modelos paramétricos que permiten predecir el comportamiento de alguno de los parámetros geométricos de la viruta en función de las variables de entrada consideradas (velocidad de corte y avance). Estos modelos facilitan la selección de los valores de los parámetros de corte a aplicar, de forma que se consiga una mejora en el rendimiento del proceso.

## 2. Metodología Experimental

A continuación se identifican y describen las distintas fases que conforman la metodología seguida, así como los recursos materiales e instrumentales empleados.

Tal y como se ha puesto de manifiesto previamente, el número de variables que intervienen en los procesos de mecanizado es elevado, lo cual hace que su estudio sea complejo. Con objeto de simplificar dicho estudio, la primera fase de la metodología experimental ha consistido en identificar las variables del proceso (entrada/salida) objeto de análisis.

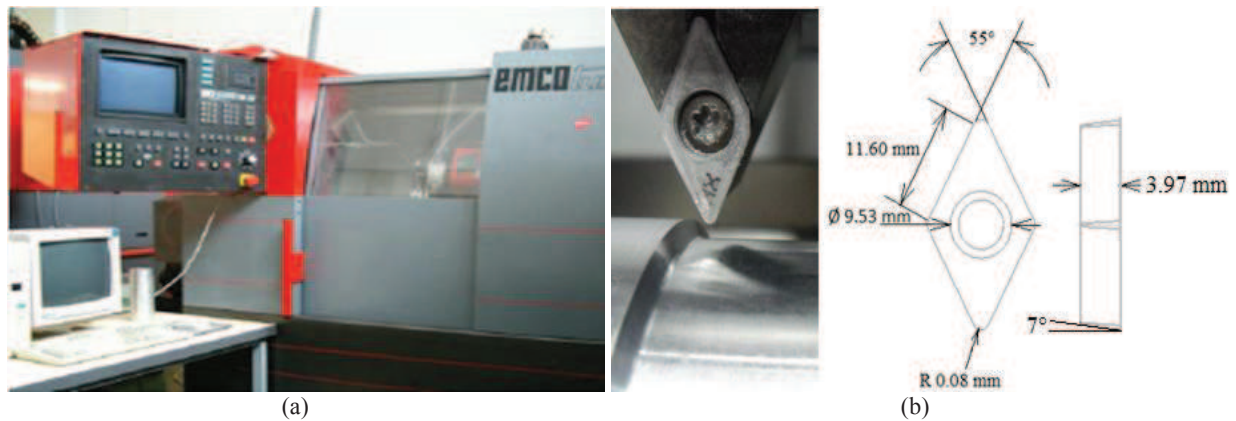
En cuanto a las variables de entrada, se han mantenido fijas al proceso a excepción de la velocidad de corte y el avance. De este modo, para la ejecución de los ensayos de mecanizado se han utilizado probetas cilíndricas de 60 mm de diámetro y 150 mm de longitud de una aleación de Titanio UNS R56400 (Ti6Al4V), cuya composición en porcentaje en masa se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1:** Composición de la aleación (% en masa)

C	Fe	N	O	Al	V	Ti
0.008	0.164	0.05	0.05	6.29	4.07	Resto

El proceso de mecanizado seleccionado para los ensayos ha sido el torneado horizontal, por su sencillez de ejecución y baja complejidad geométrica [16]. Para ello se ha hecho uso de un centro de torneado CNC, modelo Emco Turn 242, figura 1(a). Como herramientas de corte se utilizaron plaquitas de Carburo de Wolframio (WC-Co) sin recubrimiento, con referencia DCMT11T308-F2HX, y cuya geometría se muestra en la figura 1(b). Todos los ensayos se ejecutaron para un tiempo de mecanizado de 10 segundos, llevándose a cabo en ausencia total de fluidos de corte (en seco).

Con el objetivo de analizar la influencia de la velocidad de corte ( $v$ ) y el avance ( $a$ ) sobre la morfología de la viruta y sus características geométricas, se ha procedido a la realización de distintos ensayos con diversos valores de  $v$  y  $a$ , recogidos en la tabla 2. Se trata de valores habitualmente utilizados en el mecanizado de este tipo de aleaciones en aplicaciones aeronáuticas. Para todos los ensayos se mantuvo constante la profundidad de corte, tomando un valor de  $p = 1$  mm.



**Figura 1:** (a) Centro de mecanizado CNC Emco Turn 242; (b) Geometría de la herramienta utilizada en los ensayos

**Tabla 2:** Valores de  $v$  y  $a$  utilizados en los ensayos

$v$ (m/min)	25	50	75	100	125
$a$ (mm/r)	0.05	0.1	0.2	0.3	

Una vez establecidos los valores de las variables de entrada al proceso, la siguiente fase ha consistido en la ejecución de los mecanizados. En total se han realizado 20 ensayos, resultado de todas las combinaciones posibles entre los valores de  $v$  y  $a$  seleccionados. Los ensayos de mecanizado fueron monitorizados ON-LINE con el fin de registrar el proceso de formación de la viruta durante el corte. Para ello se hizo uso de una videocámara digital de alta velocidad de la marca Redlake, mod. Motion Pro X4 con iluminación (Dedocool).

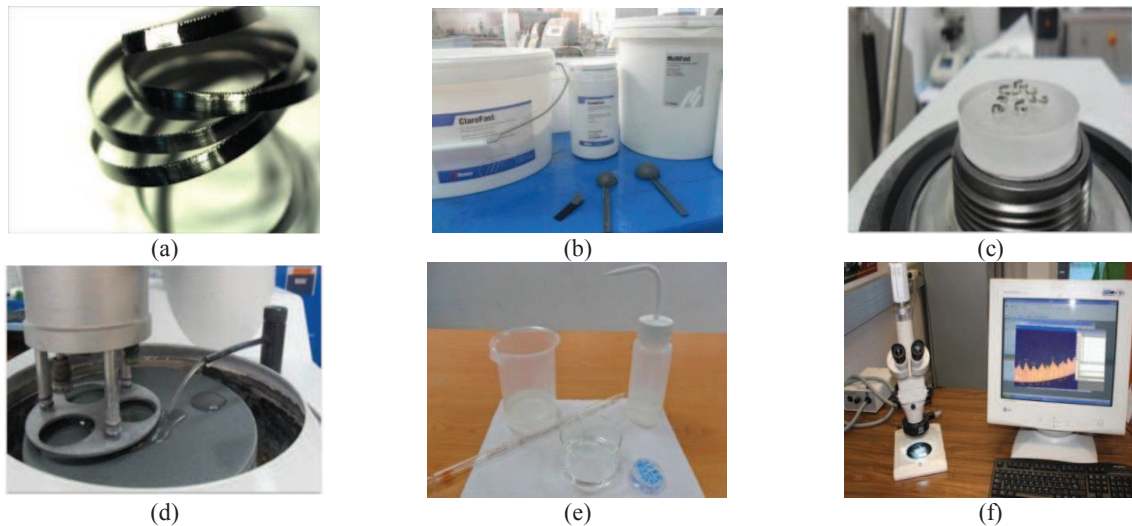
Finalizada la fase de mecanizado, se procedió a recoger la viruta generada en cada ensayo y pasar a la siguiente fase, consistente en un proceso de monitorización OFF-LINE de la viruta. Inicialmente, se procedió a su fotografiado y a su clasificación atendiendo a su morfología, siguiendo los criterios establecidos en la norma ISO 3685 [17]. A continuación, se realizaron una serie de mediciones sobre la viruta, con el objetivo de obtener los valores de algunos de sus parámetros geométricos característicos, y poder analizar su evolución en función de los valores de  $v$  y  $a$  aplicados. Para realizar estas mediciones fue necesario recurrir a técnicas metalográficas y de microscopía óptica [18].

Para facilitar la manipulación de la viruta y su posterior observación al microscopio se procedió a la preparación de una serie de probetas con muestras de la viruta. En primer lugar, se seleccionó una muestra significativa de la viruta obtenida en cada ensayo, figura 2(a). Para garantizar su sustentación durante el pulido de la probeta se aplicó una resina acrílica termoplástica, tipo Clarofast de la marca Struers, figura 2(b). A continuación, se procedió al embutido, corte y posterior pulido de la probeta. Para ello se utilizó una prensa modelo Cito-Press, figura 2(c), y una pulidora modelo Tegrasystem, figura 2(d), ambas de la marca Struers. Finalmente la probeta fue sometida a un ataque químico mediante una mezcla de ácido fluorhídrico y ácido nítrico, diluidos en agua, con el objetivo de revelar su microestructura, figura 2(e) y facilitar la toma de medidas.

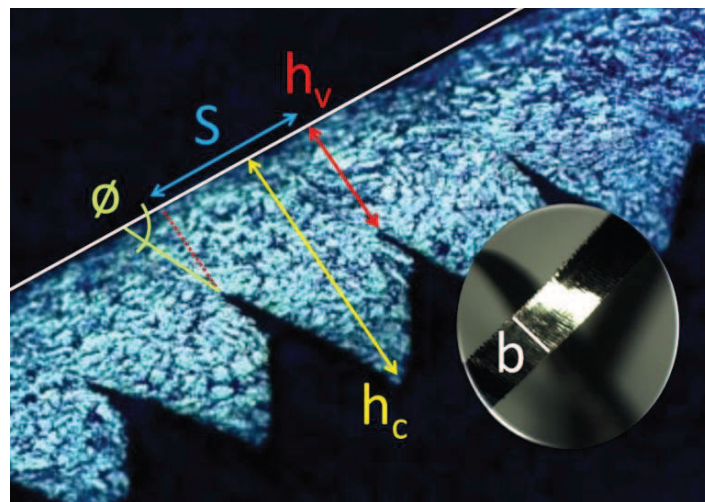
Una vez preparadas las probetas se procedió a su observación mediante el uso de técnicas de Microscopía Óptica Estereoscópica (SOM, Stereoscopic Optical Microscopy). Para ello se utilizó un microscopio estereoscópico modelo Nikon modelo SMZ 2T con un máximo de 63X, con cámara Kappa Image Base mod. CF11 DSP, tarjeta capturadora PCI SC module, con fuente emisora de luz Intralux 400 marca Volpi, con adaptadores para emisión anular y dos focos puntuales de fibra óptica, figura 2(f). La captura de imagen y las mediciones se realizaron haciendo uso del software Kappa Image Base-Control y Perfect Image V7.

Los parámetros geométricos objeto de medición se muestran en la figura 3, donde  $h_c$  es la altura de cresta,  $h_v$  la altura de valle,  $S$  la sección de viruta,  $\phi$  el ángulo de deslizamiento o cizalla y  $b$  el ancho de la viruta. Los valores de estos parámetros se han obtenido como el valor medio de las mediciones realizadas en distintos puntos de la viruta. A partir de estos parámetros se han obtenido de forma indirecta otros parámetros geométricos de interés, como el espesor de la viruta ( $t_c$ ), o el factor de recalado ( $\xi$ ) [19].

Concluida la monitorización OFF-LINE de la viruta, la siguiente fase ha consistido en el análisis e interpretación de los resultados experimentales obtenidos. Finalmente, a partir de estos datos se ha procedido a la obtención de una serie de modelos experimentales paramétricos que permiten predecir el valor de los parámetros geométricos de la viruta en función de los parámetros de corte  $v$  y  $a$ .



**Figura 1:** Proceso de elaboración de probetas metalográficas; (a) Selección de la muestra; (b) Selección de la resina; (c) Montaje y embutido; (d) Pulido; (e) Ataque químico; (f) Observación al microscopio óptico




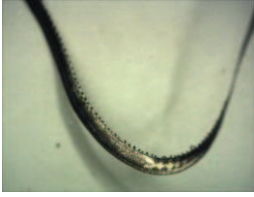










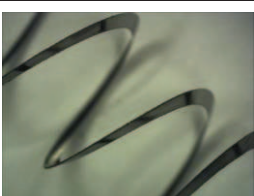


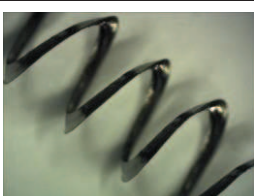

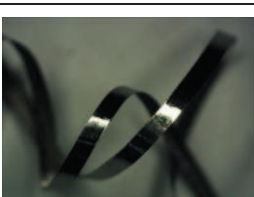

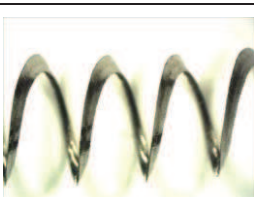
**Figura 2:** Imagen SOM (20X y 1X) de la viruta y parámetros geométricos controlados

### 3. Resultados

En la figura 4 se muestran imágenes SOM con la morfología de la viruta obtenida en función de los valores de  $v$  y  $a$  aplicados. Teniendo en cuenta los criterios de clasificación de la morfología de la viruta de la norma ISO 3685 [17], se puede decir que la tipología de viruta obtenida es, en general, de tipo helicoidal cónica enredada. La alta plasticidad de la aleación da lugar a que la viruta se deforme plásticamente sin llegar a fragmentarse, obteniéndose una viruta continua con elevada tendencia a formar nidos de viruta, figura 5(a), que dificultan la evacuación de la misma de la zona de corte. Se observa además una escasa influencia del valor de  $v$  en dicha morfología, siendo algo mayor la influencia de  $a$ . Así, para valores de  $a$  de 0.3 mm/r y valores de  $v$  de 25 y 50 m/min la viruta obtenida es de tipo helicoidal cónica corta, presentando una menor tendencia a formar nidos de viruta, figura 5(b). Todo parece indicar que los mayores esfuerzos originados a altos avances y bajas velocidades de corte dan lugar a que se supere el límite de rotura del material, existiendo una mayor tendencia a la fragmentación. Este hecho es observable en las figuras 6(a) y 6(b).

En ellas se muestran imágenes SOM de la sección de la viruta para ensayos con distintos valores de  $v$  y  $a$ . En ellas se observa cómo, debido al bajo módulo elástico de la aleación, se origina una deformación de la viruta por su plano de deslizamiento, dando lugar una viruta de tipo segmentada. Esta segmentación es más acusada al aumentar el valor de  $a$  y reducirse el valor de  $v$ , figura 6(b), con mayores diferencias de altura entre las crestas y los valles, presentando una mayor tendencia a la fragmentación.

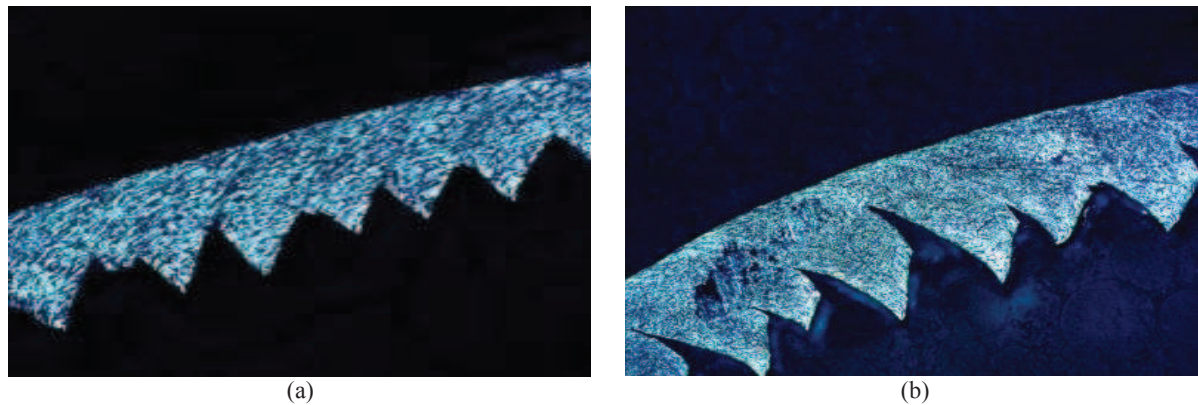


$v$ (m/min)	$a$ (mm/r)			
	0.05	0.1	0.2	0.3
25				
50				
75				
100				
125				

**Figura 3:** Imágenes SOM (1X) de la morfología de la viruta obtenida en función  $v$  y  $a$



**Figura 4:** (a) Imagen de la viruta obtenida en el ensayo con  $v = 125$  m/min y  $a = 0.1$  mm/r, donde se observa la formación de nidos de viruta. (b) Imagen de la viruta obtenida en el ensayo con  $v = 50$  m/min y  $a = 0.3$  mm/r, donde se observa una mayor tendencia a la fragmentación



**Figura 5:** Imagen SOM (20X) de la viruta obtenida en los ensayos con (a)  $v = 125$  m/min y  $a = 0.1$  mm/r y (b)  $v = 50$  m/min y  $a = 0.3$  mm/r

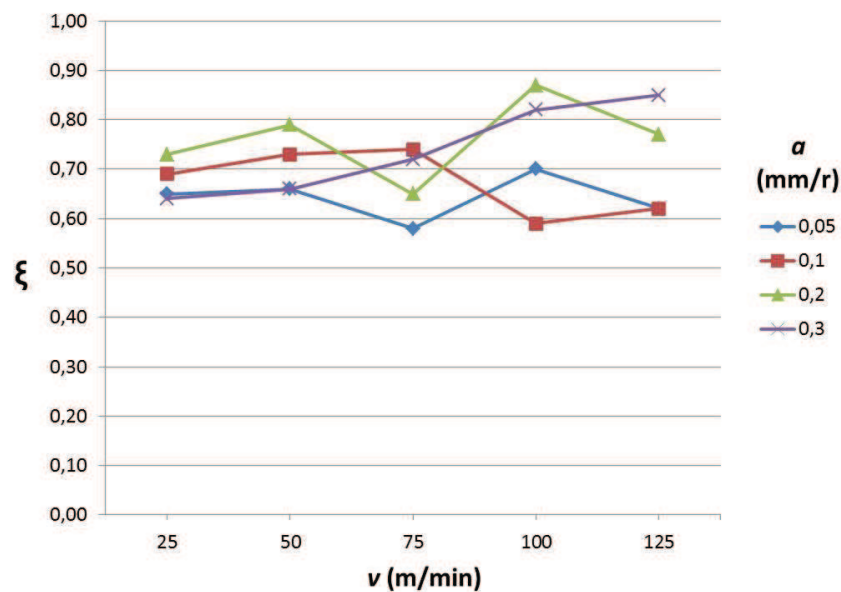
Una vez clasificada la viruta en función de su morfología y analizada su evolución en función de  $v$  y  $a$ , a continuación se presentan los resultados obtenidos para uno de los parámetros geométricos controlados, el factor de recalcado  $\xi$ , definido como el cociente entre la longitud de viruta formada e indeformada. Este factor es indicativo del grado de deformación de la viruta y, por tanto, de la fuerza de corte que es necesario aplicar en el mecanizado de la aleación. De este modo, valores elevados de  $\xi$  (próximos a la unidad) implican una baja tendencia a la compresión longitudinal de la viruta.

Admitiendo que las tensiones laterales no provocan deformaciones de la viruta en ese sentido, puede suponerse que la compresión longitudinal de la misma implica una expansión del espesor medio. Teniendo en cuenta, a su vez que, en los ensayos realizados, el ángulo de inclinación de filo es próximo a cero, el proceso de corte puede considerarse aproximadamente ortogonal. En estas condiciones, el valor de  $\xi$  puede determinarse de forma indirecta a través de la medición del ángulo de cizalladura ( $\phi$ , figura 3), haciendo uso de la ecuación [20].

$$\xi = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \quad (1)$$

dónde  $\gamma$  es el ángulo de desprendimiento, que depende de la posición relativa pieza-herramienta, y que se ha fijado en  $28.91^\circ$  para todos los ensayos.

En la figura 7 se muestra la evolución de los valores medios calculados para  $\xi$  en función de los valores de  $v$  y  $a$  aplicados en cada ensayo.



**Figura 6:** Evolución del factor de recalcado ( $\xi$ ), en función de los valores de  $v$  y  $a$  ensayados



La observación de la figura 7 pone de manifiesto una baja influencia de  $v$  sobre  $\xi$ , siendo algo mayor la influencia de  $a$ . Así, en el rango de  $v$  entre 25 y 75 m/min se puede decir que el valor de  $\xi$  presenta una tendencia general a permanecer prácticamente constante, con valores muy similares. Sin embargo, en el rango de altos valores de  $v$  considerado, entre 100 y 125 m/min, se observa un aumento del valor de  $\xi$  para los valores de  $a$  más altos, 0.2 y 0.3 mm/r, manteniéndose la tendencia a la horizontalidad para  $a = 0.05$  mm/r, e incluso una reducción para valores de  $a$  de 0.1 mm/r.

Lo anterior puede considerarse debido a que altas velocidades hay un menor tiempo de contacto y, por consiguiente, la deformación es menor. De este modo, se puede decir que la combinación de altos valores de  $v$  y  $a$  da lugar a una baja deformación de la viruta (altos valores de  $\xi$ ), por lo que las fuerzas necesarias para originar el corte serán las más altas. De igual forma, se puede decir que para  $v = 75$  m/min se encuentra el valor más favorable desde el punto de vista de la fuerza de corte necesaria, con independencia del valor de  $a$  aplicado.

Finalmente, a partir de los datos obtenidos experimentalmente, se ha procedido a la obtención de un modelo paramétrico que permita predecir el valor de  $\xi$  en función de  $v$  y  $a$ . Para ello se ha procedido a realizar un ajuste con distintos modelos, siendo el modelo potencial el que ha dado lugar a un mejor ajuste:

$$\xi = K \cdot a^x \cdot v^y \quad (2)$$

En este modelo  $K$ ,  $x$  e  $y$  son constantes. Una vez realizado el ajuste mediante regresión lineal múltiple y obtenidos los valores de las constantes, el modelo queda como sigue:

$$\xi = 0.733 \cdot a^{0.091} \cdot v^{0.033} \quad (3)$$

Como se puede observar, el valor del exponente obtenido para  $a$  en el modelo es en torno a tres veces superior al obtenido para  $v$ , lo cual indica una mayor influencia de  $a$  sobre  $\xi$  que la que presenta  $v$ , de acuerdo a lo comentado previamente.

## 4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado una propuesta metodológica para la caracterización morfológica y geométrica de la viruta en procesos de torneado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V), teniendo en cuenta su relación con parámetros y variables de entrada y/o salida asociados a la misma y al proceso, haciendo uso de valores de  $v$  y  $a$  variables. Para ello, se han identificado y descrito las distintas fases de la metodología experimental seguida, así como los recursos materiales e instrumentales empleados. Se ha diferenciado el seguimiento de la formación de la viruta (monitorización ON-LINE) y de otros parámetros geométricos de la misma (monitorización OFF-LINE). En particular, se ha prestado especial atención a la evaluación del factor de recalcado a partir del ángulo de deslizamiento.

Los resultados han puesto de manifiesto una tendencia general a la obtención de una morfología de viruta de tipo cónica enredada, con alta tendencia a la formación de nidos de viruta, en un amplio rango de valores de  $v$  y  $a$ . Esta tendencia general sólo se ve alterada para la combinación de altos valores de  $a$  y bajos valores de  $v$ , donde se observa una mayor tendencia a la fragmentabilidad.

Además, se ha observado que la influencia de  $v$  sobre  $\xi$  mucho menor que la que presenta  $a$ . Así, se ha obtenido una tendencia general de  $\xi$  a permanecer constante con  $v$ , independientemente del valor de  $a$  aplicado. Por otro lado, los valores más altos de  $\xi$  y, por tanto, las mayores fuerzas de corte, se han obtenido para la combinación de altos valores de  $v$  y  $a$ . Finalmente, a partir de los datos experimentales se ha obtenido un modelo paramétrico potencial que permite predecir el valor de  $\xi$  en función de los valores de  $v$  y  $a$  aplicados, dentro del rango estudiado.

Es preciso indicar que la metodología propuesta puede ser aplicada para el análisis de otros materiales metálicos, adaptando ciertos aspectos a las características propias de la viruta obtenida en el mecanizado de esas aleaciones.

## 5. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de Málaga – Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech por el soporte prestado en el desarrollo de este trabajo. Paralelamente, este trabajo ha sido cofinanciado por el Ministerio de Economía y Competitividad, Proyecto DPI2011-29019.

## 6. Referencias

- [1] Clearwater Industrials Team, Aerospace Global Report 2011, IMAP, (2011).
- [2] EREA. From Air Transport System 2050 Vision to Planning for Research and Innovation, Association of European Research Establishments in Aeronautics, (2010).
- [3] S. Melkote, T. Newton, C. Hellstern, J. Morehouse, S. Turner. Interfacial Burr Formation in Drilling of Stacked Aerospace Materials: Burrs - Analysis, Control and Removal, Springer Berlin Heidelberg, (2010).
- [4] B. Denkena, P. Horst, C. Schmidt, M. Behr, J. Krieglsteiner. Efficient Production of CFRP Lightweight Structures on the Basis of Manufacturing Considerations at an Early Design Stage: New Production Technologies in Aerospace Industry, Springer International Publishing, Hannover, (2013), 131-136.
- [5] M. Fernandes, C. Cook. Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, (2006), 70-75.
- [6] F. Apostolos, P. Alexios, P. Georgios, S. Panagiotis, C. George. Energy Efficiency of Manufacturing Processes: A Critical Review, Procedia CIRP, 7 (2013), 628-633.
- [7] S. Zhang, J. Li, Y. Wang. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions: Journal of Cleaner Production, 32 (2012), 81-87.
- [8] M. Batista, J. Salguero, A. Gómez-Parra, M. S. Carrilero, M. Álvarez y M. Marcos. Identification, analysis and evolution of the mechanisms of wear for secondary adhesion for dry turning processes of Al-Cu alloys: Advanced Materials Research, vol. 107, (2010), 141-146.
- [9] M. Calamaz, D. Coupard, F. Girot. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48 (2008), 275-288.
- [10] S. Garg, D. Dornfeld, K. Berger. Formulation of the Chip Cleanability Mechanics from Fluid Transport, in: Burrs - Analysis, Control and Removal, Springer Berlin Heidelberg, (2010).
- [11] M. Ávila, J. Gardner, C. Reich-Weiser, S. Tripathi. Strategies for Burr Minimization and Cleanability in Aerospace and Automotive Manufacturing, Aerospace Technology Conference and Exposition, (2005). SAE Technical Paper 2005-01-3327.
- [12] E. Rubio, A. Camacho, J. Sánchez, M. Marcos. Chip arrangement in the dry cutting of aluminum alloys: Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 16 (2006), 164-170.
- [13] J. Barry, G. Byrne. The mechanisms of chip formation in machining hardened steels: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124 (2002), 528-535.
- [14] ASM Handbook: Machining, ASM International, Vol.16, (1995).
- [15] V. Piispanen. Theory of Formation of Metal Chips, Journal of Applied Physics, 16 (1948), 877-881.
- [16] F. J. Trujillo, L. Sevilla, M. Marcos. Cutting speed-feed coupled experimental model for geometric deviations in the dry turning of UNS A97075 Al-Zn Alloy, Advances in Mechanical Engineering, vol. 2014, ID 382435, 11, (2014).
- [17] ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools, ISO, Genève, Switzerland, 1993.
- [18] J. Shackelford, A. Gordo. Introducción a la ciencia de materiales para Ingenieros, Pearson Educación, (2010).
- [19] M. Sánchez Carrilero, M. Marcos. Relaciones paramétricas en el mecanizado, Servicio de publicaciones de la UCA, Cádiz, (1994).





### **A.IX.3 Study of the influence of the cutting parameters on the chip geometry during machining alloy UNS A97075**





The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015

## Study of the influence of the cutting parameters on the chip geometry during machining alloy UNS A97075

Y. Sánchez<sup>a,\*</sup>, F. J. Trujillo<sup>a</sup>, L. Sevilla<sup>a</sup>, M. Marcos<sup>b</sup>

<sup>a</sup>University of Malaga. Department of Manufacturing Engineering, Dr. Ortiz Gomez s/n, E-29071, Málaga, Spain

<sup>b</sup>University of Cadiz, Faculty of Engineering. Mechanical Engineering and Industrial Design Dept. Av. Universidad de Cádiz 10, E-11519 - Puerto Real, Cádiz, Spain

### Abstract

This paper aims to discuss machining cutting with zinc base aluminum alloys for aircraft applications (UNS A97075) through research and development activities, as well as experiments based on the turning process with specific machining conditions - cutting speed, feed rate and cutting depth. In addition, some macro scale studies were performed on the tool life as well as experimental measuring using stereoscopic optical microscopy (SOM) techniques on the chip. The relation between influence cutting parameters on the chip geometry during machining can be used to determine the optimal cutting conditions for other processes.

© 2015 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the Scientific Committee of MESIC 2015

**Keywords:** Turning process, Cutting parameters, Chip morphology, UNS A97075

### 1. Introduction

Recently, numerous studies have investigated the development trends in conventional design in air transportation. The last decades many researchers have focused studies on materials performance based in understanding of industrial experiments about the relationship establishing cause as effect on between manufacturing and the evolution of structural materials [1], with relation of the improvement in the manufacturing technologies for the

\* Corresponding author. Tel.: +34 951 952 242

E-mail address: [yezika.sanchez@uma.es](mailto:yezika.sanchez@uma.es)



aircraft sector [2, 3]. The technological leadership of this industry is related to the use of light alloys (magnesium, aluminum and titanium alloys) and other materials, such as laminated hybrids. The impact on the development of these materials has been associated with weight ration reduction in some parts of the vehicle and the improvement of the tensile strength, that approaches or exceeds those of high strength structural steels (e.g. integral structure of aircraft)[4]. Currently, most of all mechanical components manufactured in the aircraft sector are produced through metal cutting (one of the most used techniques and oldest). For that reason, there is industrial interest on analyzing the advances of the machining process, because they influence increase of productivity during aircraft manufacture by reducing costs and its environmental impact. The improvements are focused on optimizing the machining operations during the production of some metallic components (e.g. turning, drilling, milling or grinding) before to be assembled through of preventing the generation of obstacles during assembly (chip formation). At the same time, the aim is to obtain pieces with a good dimensional precision and a high quality surface level, which results can contribute to improved performance, reduced operating costs. For this reason, one objective of this study is considering evaluate the influence of dry machining process as competitive strategy. Consequently, the use of this process requires a thorough understanding of the interrelationships which link the process, tool and workpiece as a function of chip geometry. Moreover, it should be noted that appraisal of the chip morphology is important to analyze because can influence the functionality of components as effect of productivity of process and can cause injuries.

On another hand, the aluminum alloys are one of the most commonly employed materials for aircraft market and form part of the lightweight materials group used for to face the challenge of air transportation because of their properties, such as low density, high strength, ductility, toughness, resistance to fatigue and excellent recycling potential. However, these alloys have extremely high tendency to adhere during cutting process and causing a potential risk that can lead to tool breakage and interruption of process. The 7xxx series have been widely used as structural materials in aircraft industries, amongst which have noticeable application is 7075, employed in manufacture for fuselage, stringers, and wing skins. That the reason, which is considered superplastic and have been relatively understudied in dry machining process [5-10]. Currently, there are few studies focused to analysis this alloy, most of them has been evaluated by the machinability of material through cutting forces, as well as the tool wear in relationship with quality of machined surface and accuracy of the workpiece as in the simulation of the cutting process. This investigation focused on understanding by empirical analysis of machining of lightweight alloys during turning process (using cylindrical parts with geometry cutting close to orthogonal - carried out mostly in research laboratories in order to better understand this complex process) through the comparative study of various methodologies to characterize of morphology chip correlated to the influence of the cutting parameters as cutting speed  $V_c$ , feed rate  $f$  and cutting depth  $p$ . The intention of these experiments is promote chip analysis as a possible indicator that help to understand the machining process and influence significantly on the properties of the work material, the tool and the cutting parameters [11-13].

#### Nomenclature

$V_c$	cutting speed
$f$	feed rate
$p$	cutting depth
$h_c$	height of peak
$h_v$	height valley
$G_s$	degree of segmentation chip
$S$	distance between peaks
$\emptyset$	sliding angle
$b_v$	width of chip
$S_v$	chip area
$S_v$	chip area
$\xi$	shrinkage factor

## 2. Experimental

This experimental study was designed to evaluate behavior of material *UNS A97075* with chemical composition shown in Table 1, during cutting process to determine the main influence on the chip morphology under certain conditions generated on the first stage of machining.

Table 1. Chemical composition of UNS A97075


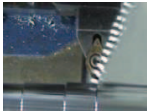










Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Mn	Al
6,03	2,62	1,87	0,19	0,15	0,09	0,07	Rest

Experimental work was conducted in order to study the effect of cutting parameters. In particular with feed rate keeping constant the variables like cutting speed and cutting depth. This variable was justified by recent studies which demonstrate that  $f$  have most influence in chip morphology [14-16]. For this experiments has been employed these cutting parameters:  $V_c$  80 m/min, cutting depth  $p$  1 mm and various values of feed rate  $f$  are 0.05, 0.1, 0.2 and 0.3 mm/r during the first stage of machining with time 10 s) on the chip geometry side flow during dry turning test a cylindrical bar (length of 150 mm and  $\phi$  60 mm) of aluminum alloy UNS A97075. The tests were carried out in a parallel lathe Pinacho S-90/180, with tool insert of TiN coated WC-Co from SECO supplier (DCMT11T308F2 TP1000) whose geometry cutting is close to orthogonal cutting. In order to maintain the same initial conditions were used new tools in each cutting test, and the same time, some samples of the chip were collected after cutting. First step the chip morphology characterized by geometrical measurements used monitoring system. In this case, was monitored by using a SONY DCR-DVD92E Digital Camera (ON Line) and the dimensional of chip was measured by an optical microscope NIKON model SMZ 2T, Kappa Image Base camera model CF11 DSP (OFF Line) for this step was necessary to using metallurgical processes. The methodology has to following the next steps: selection of chip, mounting in epoxy resin, mechanical grinding and polished to reveal their sections and the last step was etching with Keller reagent (2ml HF 48% + 3ml HCl + 5ml HNO<sub>3</sub> + 190ml H<sub>2</sub>O) for 20 seconds. Finally, the geometry chip was generally evaluated at some points (e. g. appearance and dimension) using the ISO 3685:1993 standard [17]. The images were processing by ImageJ program - commercial software. However, it must be stated that slight adjustments were made based on the characteristics of the material studied [18].

## 3. Results and discussion

The results obtained of experiments showed the variation on chip geometry through different cutting conditions with respect a  $f$  in Table 2.

Table 2. Experimental chip obtained on the cutting process at  $V_c$  80 m/min

	$f$ (mm/r)			
	0.05	0.1	0.2	0.3
Machining process				
Macrophotograph y of the chip 10x				
SOM image of a chip 20x				
	Continuous-Snarled	Conical helical - Long	Tubular chip-Long	Serrated- Short

In experimental work showing on the first level, the trends of chip geometry with similar serrated appearance in compared to other materials. In generally, the chip morphology characterization of UNS A97075 alloy according to different values of  $f$ , the preliminary assessment was represented by macrophotography of chip obtained, is generally continuous helical type, since the alloy has a high level of plasticity. However, the picture shown on the second level, experimental scenarios when  $f$  increase and also can be seen that a 0.3 mm/r the chip tends to be more fragment ability compared with 0.2 mm/r can be classified long tubular chip. In particularly, with 0.1 mm/r the chip is conical helical (segmented, more stable) on comparisons with other values, but the worst scenario, can be observed with low feed rate as is the case 0.05 mm/r, where chip is obtained in the form of tape with a tendency to form spiral chip snarled will be causing damage to the machined surface as the tool life. Furthermore, the last level shows images SOM 20x chip during machining. Thus, can do a preliminary assessment qualitatively was identify that increasing geometrical value. For this reason, is necessary to evaluate the micro scale studies of the chip through to monitoring of the different methodologies which establish the optimal procedure for handling and data acquisition.

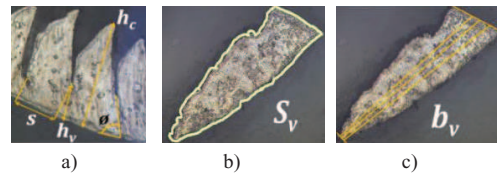


Fig. 1. a) Measured parameters on chip; b) Chip area,  $S_v$  and c) Width of chip,  $b_v$ .

Figure 1a shows the parameters measured on the chip longitudinal section: height of peak  $h_c$  (mm) and height valley  $h_v$  (mm), the difference of them can be determined the degree of segmentation chip  $G_s$  (mm), which was calculated using equation (1) and chip section calculated by the distance between peaks  $S$  (mm) and the sliding angle  $\theta$  ( $^\circ$ ) on the chip. In the case of Figure 1b and 1c are discussed later on.

$$G_s = \frac{h_c - h_v}{h_c} \quad (1)$$

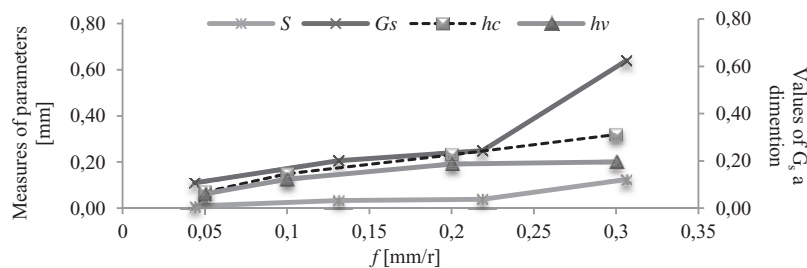


Fig. 2. Evolution of the chip geometry parameters as a function of  $f$

The experimental results were shown in Figure 2, can display the growth trend of all the parameters on chip geometry with respect to the feed rate machining. The chip tends to fragment, resulting in differences in height between peak and valley, which is represented by the degree of segmentation chip  $G_s$  and a slight increase in chip segment, is also observed causing an oscillation in its deformation. In parameter  $S$  has gradually increased, indicating a dependence on the value of  $f$ , accompanied by a possible energy to condition the cut growth. The increase in the degree of segmentation chip  $G_s$ , indicates the possible thermal instability of the material to high values of  $f$ . The last important point is to measuring the complementary of sliding angle  $\theta$  ( $^\circ$ ) on the chip, after that was measured can be calculating the shear angle  $\phi$  ( $^\circ$ ) by using equation (2).

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \phi \quad (2)$$

where,  $\phi$  is the shear angle and  $\phi$  is complementary or sliding angle each experimental test.

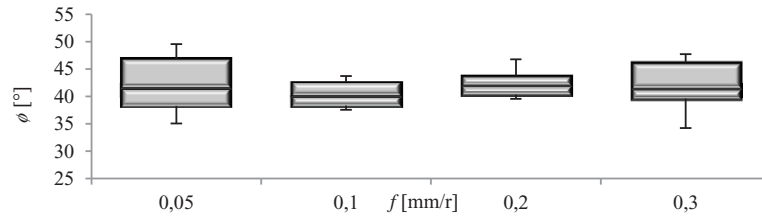






Fig. 3. Shear angle  $\phi$  values in whiskers plot as a function of  $f$

The mean values of shear angle are illustrated in Figure 3. This angle determinate the position of the plane in which the material slips during machining and can observe a shear angle stability function  $f$  in which the average value ranging between  $40^\circ$  to  $41^\circ$ , this value indicates that actually applies where Stabler theory indicates that for a  $\lambda$  equal  $0^\circ$ , the shear angle can vary between  $10^\circ$  and  $45^\circ$ . Another parameter possible of calculate is the shrinkage factor  $\xi$ , using to quantifying compression of the material during the cutting process. For calculated the  $\xi$  is necessary to evaluate the cross section of the chip through two variables of study: width  $b$ , of chip (mm) and chip area  $S_v$  ( $\text{mm}^2$ ).

Table 3. SOM images of cross section of chip obtained on the cutting process at  $V_c$  80 m/min

	$f$ (mm/r)			
	0.05	0.1	0.2	0.3
Cross section of chip (10x)				

On the first level of the Table 3 shows the cross section of the chip into relation with respect  $f$ . In another hand, was necessary to measure  $S_v$  and calculate the theoretical relationship on the cross section of the undeformed chip  $S_o$  ( $\text{mm}^2$ ) before cutting by using equation (3).

$$S_o = p \times f \quad (3)$$

where,  $S_o$  is the cross section of chip before cutting and  $p$  is the depth cutting and  $f$  is the feed rate each experimental test.

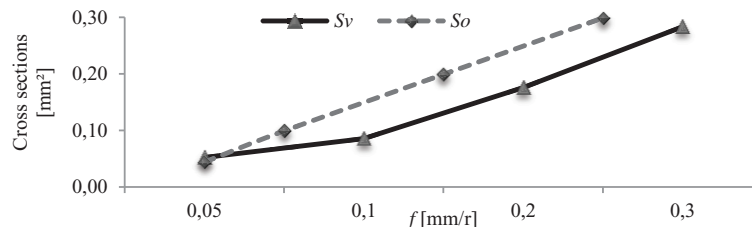


Fig. 4. Cross sections of the chip  $S_o$  before and  $S_v$  after cutting as a function of  $f$

In Figure 4, shown the trend of between the chip undeformed section  $S_o$  with a high degree of similarity with respect to  $S_v$  after cutting, shows slight involvement in cutting process. In another hand, it should be noted that was necessary determine the chip width before  $b_o$  which is represented numerically by using equation (4).

$$b_o = \frac{p}{\sin \chi} \quad (4)$$

where,  $b_o$  is the width of the chip to be removed and  $p$  is the depth cutting and  $\chi$  is the tool cutting edge angle, with as result is close to 1.10 mm.

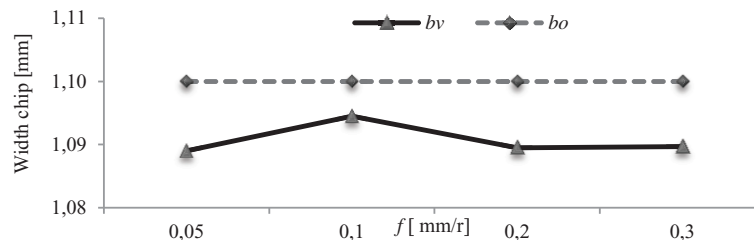


Fig.5. Comparative trajectories of the width chip  $b_o$  and  $b_v$  as a function of  $f$

Figure 5, shown the results of trajectory the width of chip  $b_o$  and  $b_v$  as a function of  $f$ , are slightly significant between them. For that reason is verified the Stabler Hypothesis, so that the measured values should be close to those obtained in orthogonal cutting, as obtained some compression of the material during the cutting process. In order to conclude with the evaluation of the deformation of the material during machining  $\xi$  was necessary to calculate by equation (5).

$$\xi = \frac{b_o \sin \phi}{b_v \cos(\phi - \gamma)} \quad (5)$$

where,  $\xi$  is the shrinkage factor,  $b_o$  width chip before and  $b_v$  after cutting and  $\phi$  represent the shear angle and  $\gamma$  the rake angle, with as result shown in Figure 6.

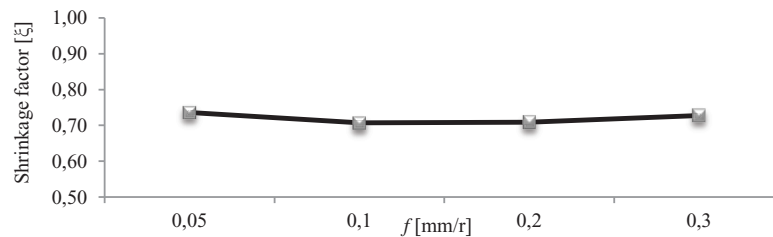



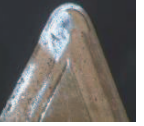


Fig. 6. Shrinkage factor values evaluated as a function of  $f$

In the beginning of this paper was mentioned that the aluminum alloys have a high tendency to adhere during cutting process and causing ductile chip, that complicate the machining process and in Figure 6, shown little change of shrinkage factor values to according to increase of  $f$  whose results are related to ductility of the material in the zone of the cutting edge of the machining tools. This parameter can be used to estimate the horsepower required on the machining process and it is related with interface of the chip and the tool [19, 20].

Finally, the last part experimental was focused into evaluation of the tool after cutting process by techniques SOM, shown on the Table 4, whose result is evident, the tool wear progression in function of  $f$ . This is due to increased efforts and pressures in the cutting zone, which facilitates the adhesion of the material to cause for thermo mechanical effects visualized on rake face of tool Built Up Layer [21, 22]. Therefore, the wear appears when the geometry of chip is continuous form and causing stresses during contact with tool and has strong relation with cross section. In the case of Built Up Edge their presence is unstable and caused by the formation of an adhesive layer of the workpiece caused by their ductility.

Table 4. SOM images of tool obtained on the cutting process at  $V_c$  80 m/min

	$f$ (mm/r)			
	0.05	0.1	0.2	0.3
Rake face of tool (30x)				

The last part was considered some relevant bibliography references with similarity to this experiment and was done comparison of the previous results of chip geometry during machining process. At first stage of the machining, the chip that was created in homogeneous form and is cut into fragments when specific value for chip thickness is reached and to be related with tool life, whose data are discussed below in Table 5.

Table 5. Comparative summary of the chip geometry as function of cutting parameters

Chip geometry	Cutting parameters			Tool life
	$\uparrow V_c$	$\uparrow p$	$\uparrow f$	
Height of peak $h_c$ (mm)	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
Height valley $h_v$ (mm)	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
Degree of segmentation chip $G_s$ (mm)	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
Distance between peaks $S$ (mm)	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
Shear angle $\phi$ ( $^\circ$ )	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\uparrow$
Shrinkage factor $\xi$	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
Width of chip $b_v$ (mm)	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\uparrow$
Cross section area $S_v$ (mm <sup>2</sup> )	$\Leftrightarrow$	$\Leftrightarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$

#### 4. Conclusions

The obtained results from the chip analysis during machining of alloy UNS A97075 show the correlation between cutting parameters on chip geometry. In addition, the results obtained from experiment tests are found that:

- For this study, it was possible to adjust some methodologies applied in other materials. In this case, using of stereoscopic optical microscope and metallographic techniques.
- It was observed that  $f$  is the parameter has influences on chip geometry except on width chip and strong relation to the tool life.
- According to the experimental results, the proposed methodology can provide and identify of chip geometry the alloy UNS A97075 with respect to cutting parameters and also was validated the morphology of chip in relation to the ISO 3685:1993 standard.
- Through of experimental was possible to identify and understand that increased values of  $f$  the tool wear progression becomes larger, more unstable and can to adversely residual affect the machined surface and chip geometry.

Some future interest work as follows: It will be to correlate in macro scale some geometrical parameters of the chips in relationship with surface finish and tool life.

## 5. Acknowledgements

This work has been funded by University of Malaga, International Campus of Excellence Andalucia Tech, by the Andalusian Government and the UE-FEDER (Project DIANNA).

## 6. References

- [1] I. Secretariat. ICAO Environmental Report 2010: Aviation Outlook, 2010.
- [2] D. King ,C. Carey. Advanced aerospace materials: past, present and future. Aviation and the Environment, (2009), 22-27.
- [3] EREA. From Air Transport System 2050 vision to planning for research and innovation. Amsterdam, Netherlands, 2010.
- [4] E. O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane. An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of Materials Processing Technology, 134 (2003), 233-253.
- [5] A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus, W. S. Miller. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications. Materials Science and Engineering, 280 (2000), 102-107.
- [6] G. Chen, J. Li, Y. He, C. Ren. A new approach to the determination of plastic flow stress and failure initiation strain for aluminum alloys cutting process. Computational Materials Science, 95 (2014), 568-578.
- [7] J. P. Immrigeon, R. T. Holt, A. K. Koul, L. Zhao, W. Wallace, J. C. Beddoes. Lightweight materials for aircraft applications. Materials Characterization, 35 (1995), 41-67.
- [8] T. H. G. Megson. Chapter 12: Structural components of aircraft. Aircraft Structures for Engineering Students (5<sup>a</sup> Edition). Butterworth-Heinemann, (2013), 395-415.
- [9] E. A. Starke Jr, J. T. Staley. Application of modern aluminum alloys to aircraft. Progress in Aerospace Sciences, 32 (1996), 131-172.
- [10] J. C. Williams, E. A. Starke Jr. Progress in structural materials for aerospace systems. Acta Materialia, 51 (2003), 5775-5799.
- [11] F. J. Trujillo, L. Sevilla, M. Marcos. Influence of the Axial Machining Length on Microgeometrical Deviations of Horizontally Dry-turned UNS A97075 Al-Zn Alloy. Procedia Engineering, 63 (2013), 405-412.
- [12] E. Rubio, A. Camacho, J. Sánchez-Sola, M. Marcos. Chip arrangement in the dry cutting of aluminium alloys. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 16 (2006), 164-170.
- [13] B. de Agustina, C. Bernal, A. Camacho, E. Rubio. Experimental Analysis of the Cutting Forces Obtained in Dry Turning Processes of UNS A97075 Aluminium Alloys. Procedia Engineering, 63 (2013), 694-699.
- [14] M. Batista, J. Salguero, A. Gomez-Parra, S. Fernández-Vidal, M. Marcos. SOM based Methodology for Evaluating Shrinkage Parameter of the Chip Developed in Titanium Dry Turning Process. Procedia CIRP, 8 (2013), 533-538.
- [15] M. Calamaz, D. Coupard, F. Girot. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48 (2008), 275-288.
- [16] M. Batista, M. Calamaz, F. Girot, J. Salguero, M. Marcos. Using Image Analysis Techniques for Single Evaluation of the Chip Shrinkage Factor in Orthogonal Cutting Process. Material Forming - Esaform, Pts 1 & 2, Trans Tech Publications Ltd, 504-506 (2012), 1329-1334.
- [17] ISO 3685:1993. Tool-life Testing with Single Point Turning Tools. ISO, Genève, Switzerland 1993.
- [18] Y. Sánchez, F.J. Trujillo, L. Sevilla, M. Batista, M. Marcos. Propuesta metodológica para la caracterización de la viruta en el torneado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V). XX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 2014.
- [19] M. Batista. Características de los mecanismos de adhesión secundaria y su influencia en el desgaste de herramientas de corte. Aplicación al mecanizado en aleaciones ligeras. Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, España, 2013.
- [20] M. Marcos, M. Sánchez. Relaciones paramétricas en el mecanizado. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, 1994.
- [21] F. Trujillo, L. Sevilla, M. Marcos. Introducción a la metodología de análisis experimental para la caracterización de parámetros de corte en aleaciones ligeras. Revista digital Metalmecánica, 2012.
- [22] D. García Jurado, J. M. Mainé, M. Batista, L. Shaw, T. Hausotte, M. Marcos. Metrological Evaluation of Secondary Adhesion Wear Effects in the Dry Turning of UNS-A92024-T3 Alloy through Focus-variation Microscopy (FVM). Procedia Engineering, 63 (2013), 804-811.







#### **A.IX.4 Estudio experimental de las fuerzas de corte durante el mecanizado con aleaciones de titanio**



# Estudio experimental de las fuerzas de corte durante el mecanizado con aleaciones de titanio

Y. Sánchez<sup>1</sup>, L. Sevilla<sup>1</sup>, M. Marcos<sup>2</sup>, F. J. Trujillo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Ingeniería Civil de Materiales y Fabricación. Universidad de Málaga, [yezika.sanchez@uma.es](mailto:yezika.sanchez@uma.es), [lsevilla@uma.es](mailto:lsevilla@uma.es)

<sup>2</sup> Dpto. de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad de Cádiz, [mariano.marcos@uca.es](mailto:mariano.marcos@uca.es)

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Universidad de Jaén, [fjvilches@ujaen.es](mailto:fjvilches@ujaen.es)

**Palabras clave:** Fuerzas de corte, mecanizado con corte ortogonal, aleaciones de titanio

Una de las tendencias más emergentes que afronta el sector aéreo se centra en el conformado de componentes mecánicos con elevados niveles de precisión mediante procesos de alto rendimiento. Ello conlleva la necesidad de rediseñar procesos y productos hacia una máxima sostenibilidad en su fabricación y una elevada funcionalidad en su aplicación.

Las aleaciones con base de titanio cada vez son más empleadas en zonas críticas de las aeronaves [1], debido a sus elevadas propiedades mecánicas, incluso a altas temperaturas y su excelente resistencia a la corrosión. Muchas de esas piezas requieren proceso de mecanizado durante su fabricación. Sin embargo, estos procesos resultan especialmente complicados debido a las características mecánicas de dicha aleaciones y a su alta reactividad con el oxígeno a temperaturas moderadas. Por ello, aunque se han desarrollado modelos predictivos para las condiciones óptimas del mecanizado [2-4], éstos no contemplan la posibilidad de acoplarse a sistemas de control adaptativo sobre la base de relaciones que ligen variables de salida del proceso. Todo ello justifica el interés del presente estudio, que pretende implementar un sistema de monitorización ON LINE, que permita caracterizar la morfología de la viruta y la vida de la herramienta mediante la captura de las señales de fuerza de corte durante el mecanizado.

Para ello, en primer lugar, se ha desarrollado un diseño experimental adaptado a la funcionalidad del mecanizado de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V), con velocidad de corte entre 30 y 65 m/min y avances entre 0.2 y 0.3 mm/r. Así, se ha desarrollado un sistema que permite medir, en tiempo real, las fuerzas de corte generadas durante su mecanizado. Se han establecido una serie actividades que conforman las 3 fases principales de este estudio: el diseño de probetas con geometría adaptable que permite recrear un corte cercano al ortogonal; la adquisición de las fuerzas mediante el uso de dispositivo piezoeléctrico, a través de un diseño de interface que permite extraer datos de forma instantánea; y finalmente la construcción de modelos óptimos de regresión, relacionados con la variación geométrica de la viruta obtenida en cada ensayo, y las posibles alteraciones geométricas en la herramienta de corte en función del grado de influencia de cada escenario de corte, para determinar una combinación que permita trabajar de forma paralela con ambos criterios, en función de las necesidades del proceso.

## REFERENCIAS

- [1] J. P. Immearigeon, R. T. Holt, A. K. Koul, L. Zhao, W. Wallace, and J. C. Beddoes. Lightweight materials for aircraft applications. *Materials Characterization*, 35 (1995), pp. 41-67.
- [2] S. Sun, M. Brandt, and M. S. Dargusch. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49 (2009), pp. 561-568.
- [3] A. Daymi, M. Boujelbene, S. B. Salem, B. H. Sassi, and S. Torbaty. Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces. *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 1 (2009), pp. 77-83.
- [4] G. Sutter and G. List. Very high speed cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy—change in morphology and mechanism of chip formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 66 (2013), pp. 37-43.

\* Corresponding author.

Tel.: +34 951 952 242 , E-mail address: [yezika.sanchez@uma.es](mailto:yezika.sanchez@uma.es)

# Estudio experimental de las fuerzas de corte durante el mecanizado con aleaciones de titanio

Y. Sánchez Hernández<sup>1a</sup>, F. J. Trujillo Vilches<sup>1b</sup>, L. Sevilla Hurtado<sup>1c</sup>, M. Marcos Barcena<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dpto. de Ingeniería Civil de Materiales y Fabricación. Universidad de Málaga. <sup>a</sup>yezika.sanchez@uma.es, <sup>b</sup>trujillov@uma.es, <sup>c</sup>lsevilla@uma.es

<sup>2</sup>Dpto. de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad de Cádiz. mariano.marcos@uca.es

*En el presente estudio se analiza el desarrollo de un sistema de monitorización ON LINE que permite relacionar la morfología de la viruta y la vida de la herramienta mediante la adquisición de las señales de fuerza de corte durante el mecanizado. Para ello, en primer lugar, se ha desarrollado un diseño experimental adaptado a la funcionalidad del mecanizado de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V), a través de una serie de actividades conformadas en 3 fases: el diseño de probetas con geometría adaptable, que permite recrear un corte cercano al ortogonal; la adquisición de las fuerzas mediante el uso de un dispositivo piezoeléctrico, a través de un diseño de interface que permite extraer datos de forma instantánea; y, finalmente, la ejecución de diversos ensayos. Posteriormente, se realiza un análisis de los resultados relacionados con la variación geométrica de la viruta obtenida en cada ensayo, así como de las posibles alteraciones generadas en la herramienta de corte en función del grado de influencia de cada escenario de trabajo.*

## 1. Introducción

Una de las tendencias más emergentes que afronta el sector aeronáutico [1] se centra en el conformado de componentes mecánicos con elevados niveles de precisión mediante procesos de alto rendimiento. Ello conlleva la necesidad de rediseñar procesos y productos hacia una máxima sostenibilidad en su fabricación y una elevada funcionalidad en su aplicación. Muchos de los procesos empleados en la fabricación de piezas aeronáuticas conllevan el empleo de tecnologías de mecanizado, aplicadas a aleaciones ligeras (de aluminio y titanio principalmente). En concreto, en este trabajo, se analizará el mecanizado de la aleación Ti6Al4V (UNS R56400) por su implicación en zonas críticas de las aeronaves, debido a sus elevadas propiedades mecánicas, incluso a altas temperaturas y su excelente resistencia a la corrosión. Sin embargo, debido a las características mecánicas y a su alta reactividad con el oxígeno a temperaturas moderadas resulta especialmente complicado su mecanizado. Precisamente, esta última característica puede originar cambios en la herramienta por lo que es necesario disponer de un control de las fuerzas de corte que, por una parte garantice el rango de trabajo de la herramienta y, por otra, pudiera ser aplicable a robots para la automatización de los procesos.

Sin embargo, las tecnologías actuales aún no han logrado determinar por completo su comportamiento durante su mecanizado, por lo que diversos investigadores han desarrollado modelos que permiten predecirlo a través de estudios relacionados con el desgaste de la herramienta, determinando la maquinabilidad de dicha aleación [2, 3]. Sin embargo, éstos no contemplan la posibilidad de acoplarse a sistemas de control adaptativo sobre la base de relaciones que ligen variables de salida del proceso.

Desde la perspectiva más general, la selección de este material se ajusta a la demanda actual del sector aeronáutico [4-6], siendo objeto de diversas líneas de investigación que ya han dado su fruto en diversas Tesis Doctorales en el seno de los grupos cuya colaboración ha dado origen a este trabajo, como es el caso del grupo de investigación TEP933 de la Universidad de Málaga [7], y del grupo TEP027 de la Universidad de Cádiz [8]. Todo ello justifica el interés del presente artículo, que pretende implementar una nueva perspectiva para caracterizar el mecanizado de aleaciones de titanio mediante un análisis exhaustivo de la evolución de las fuerzas de corte, ya que afectan de forma evidente al estado de la herramienta de corte, que a su vez tiene influencia directa con la geometría de la viruta. En este estudio, se han aplicado técnicas de monitorización *ON LINE* y *OFF LINE*, de manera constante, a fin de obtener una visión general, identificando cada variable y la interacción que existe entre ellas.

## 2. Metodología Experimental

La metodología experimental tiene como propósito aplicar diversas técnicas de monitorización, entre ellas el monitoreo *ON LINE*, logrando capturar de forma instantánea el comportamiento de las fuerzas de corte durante su mecanizado y, de igual forma, la técnica de monitorización *OFF LINE*, permitiendo analizar los aspectos macrogeométricos de la viruta y la herramienta de corte. Para ello, fue necesario establecer ciertos pasos que conforman el protocolo experimental, (Figura 1).



**Figura 1:** Esquema del protocolo experimental

Tal como se observa en la figura anterior, la etapa inicial, se encuentra relacionada con la determinación de las variables de estudio para el mecanizado de la aleación Ti6Al4V. En la etapa 2 y 3, establecen una serie de actividades que permiten la elaboración de los ensayos, la cual abarca desde la codificación del ensayo, preparación (Set up) del equipo, ejecución de cada ensayo aplicando la monitorización *ON LINE*. Seguido por la recaudación y manipulación de muestras para la abstracción de datos mediante la monitorización *OFF LINE*. Concluyendo, con el análisis y evaluación previa de resultados, describen la fase 4. Esta fase permite organizar y relacionar los datos creando un panorama real de los efectos encontrados durante la ejecución de los ensayos. Donde fue necesario el uso de técnicas de observación para tener un mejor control de los sucesos en cada etapa, brindando una trazabilidad de ellos antes de ser caracterizados y finalmente la generación de una serie de reportes que permiten resumir su comportamiento mediante gráficos y previos análisis de los hechos.

### 2.1. Determinación de las variables de estudio

Se realizó un análisis mediante Espectrometría de Energía Dispersiva (EDS) al material de trabajo mediante la extracción de un fragmento de muestra, para conocer el porcentaje real de su composición química, lo que permite realizar una comparativa más certera con respecto a los límites estipulados a sus estándares (Tabla 1). Para ello se empleó un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío JEOL, modelo SM-6490LV acoplado a un Espectrómetro EDS con software INCA Energy de Oxford Instruments Analytical, ubicado en los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación (SCAI) de la Universidad de Málaga.

**Tabla 1:** Composición de la aleación Ti6Al4V (% en masa)

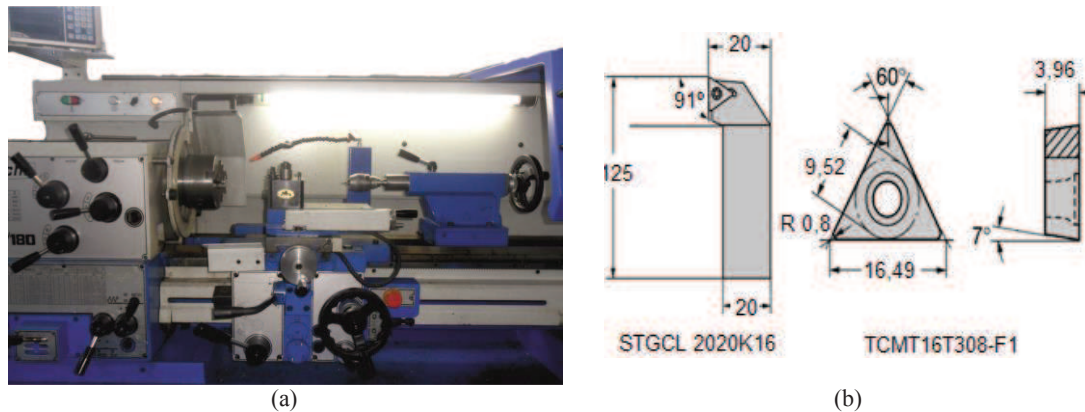
	C	Fe	N	O	Al	V	Ti
Pieza	0,08	0,164	0,05	0,05	6,29	4,07	Resto
Estándar	0,08	0,25	0,05	0,02	5,5-6,7	3,5-4,5	Resto

Posteriormente, se procedió a identificar la operación de corte. Aunque la mayor parte de los procesos de mecanizado se ajustan al modelo de corte oblicuo, en la práctica es recurrente emplear el modelo de corte ortogonal, reduciendo la complejidad geométrica y describiendo la mecánica de las operaciones de corte con buena aproximación. Por tal motivo, se ha optado por un caso real bajo diversas condiciones de mecanizado, con aproximación cercana al corte ortogonal, a través de operaciones de torneado horizontal (cilindrado).

Para ello, se utilizó un torno convencional paralelo modelo Pinacho S-90/180, con visualizador digital de cotas MANV-301T, de la marca Fagor, con potencia máxima de 3.4 kW, ubicado en el taller de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Málaga, Figura 2(a). Todos los ensayos se ejecutaron en ausencia total de fluidos de corte (en seco) para favorecer, por una parte el rendimiento medioambiental y, por otra, para disponer de las condiciones más agresivas en la interacción herramienta-pieza.



Se usaron plaquitas de Carburo de Wolframio (WC-Co) con recubrimiento TP2500 de la marca SECO, con referencia TCMT16T308, Figura 2(b). Para cada escenario de corte se considera un filo de corte nuevo, con el propósito de evitar posibles alteraciones en la captura de las fuerzas como en la viruta.



**Figura 2:** (a) Equipamiento de trabajo y (b) Codificación y características geométricas de herramienta de corte mediante norma ISO 1832:2012 [9]

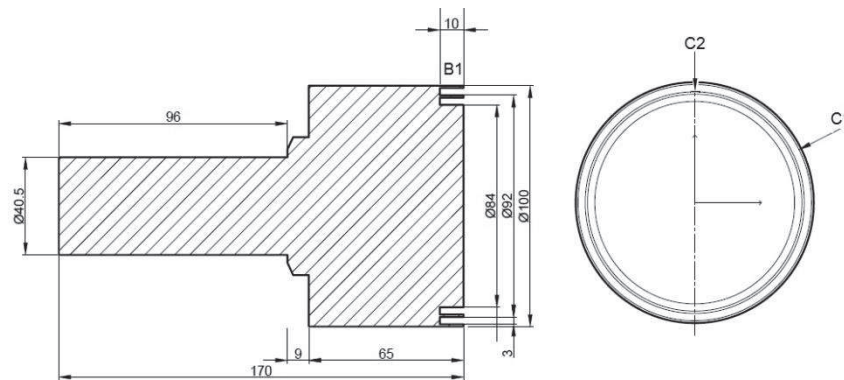
Se tomaron como variables de entrada los parámetros tecnológicos más comunes: la velocidad de corte  $V_c$ , el avance  $f$  y la profundidad de corte  $ap$ ; sus combinaciones generan los diferentes escenarios de corte, Tabla 2.

**Tabla 2:** Parámetros tecnológicos de trabajo

$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/r]	$ap$ [mm]
30	0,2	1
65	0,3	

## 2.2. Diseño de la probeta de trabajo

La preforma se diseñó mediante una geometría de forma tubular, para permitir simular la mecánica de corte ortogonal análoga a la de un proceso de limado, adaptada a las dimensiones iniciales del material a estudiar en función de la geometría de corte esperada, Figura 3. A tal efecto, se realizaron una serie de cortes en la geometría original del material, partiendo de una barra de la aleación Ti6Al4V de 170 mm de longitud y  $\varnothing$  100 mm.



**Figura 3:** Diseño y codificación de la probeta

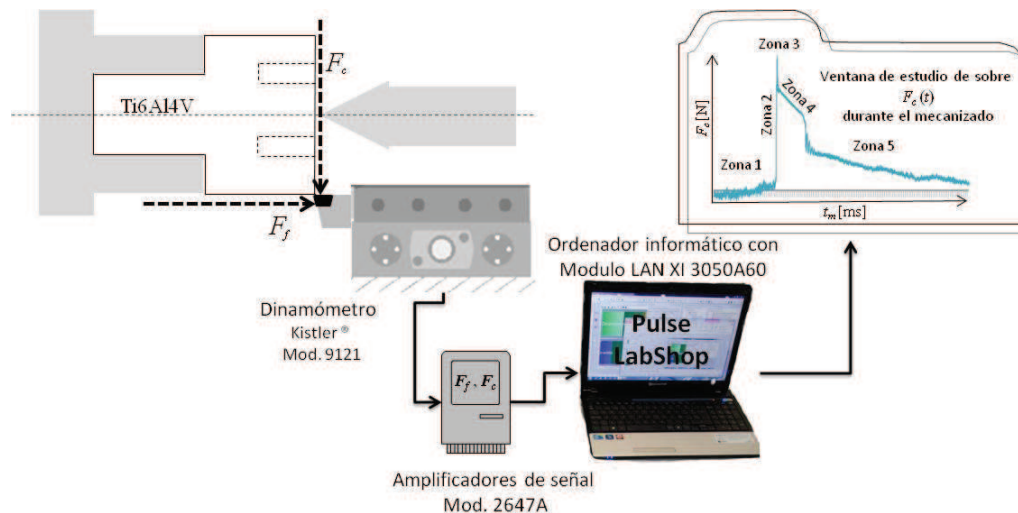
De esta forma, en el diseño de la probeta de trabajo se logra identificar una sección perpendicular a su longitud, que representa el bloque de trabajo  $B_1$  a una distancia 10 mm; equivalente a la magnitud total del corte correspondiente a un determinado rango de  $V_c$  bajo ciertos valores de  $f$ . El bloque de trabajo; equivalente a 80 ensayos, se encuentra formado por dos ranuras frontales (corona de trabajo) ubicadas a distintos diámetros. Con dimensiones externas de  $C_1$  de  $\varnothing$  100 mm, la cual estará expuesta a  $V_c$  de 30 m/min y  $C_2$  de  $\varnothing$  92 mm a  $V_c$  de 65 m/min, las coronas están mecanizadas a una profundidad de corte  $ap$  de 1 mm, para fijar el ancho de la viruta.

El diseño experimental se encuentra adaptado a las condiciones industriales del mecanizado de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V). Para finalizar el diseño, fue necesario establecer un último corte, denominado como operación de desahogo, para garantizar un régimen de velocidad constante, precisándose para ello medir e identificar el momento de aceleración del motor del torno hasta lograr el régimen permanente establecido, el cual está determinado por el intervalo de tiempo que transcurre de uno a otro (cuando las variaciones terminan por

amortiguarse). Este intervalo se denominó tiempo de desahogo,  $t_d$  (tiempo necesario para alcanzar el régimen estacionario). Para realizar dicha medición se empleó un osciloscopio digital de la marca RIGOL, modelo DS 1022C.

### 2.3. Protocolo de ensayo

Una vez determinadas las variables de entrada, se estableció el esquema de trabajo de la Figura 4, a fin de adecuar los recursos necesarios para la adquisición de señales eléctricas emitidas mediante el uso de dispositivo dinamométrico piezoeléctrico, capaz adquirir de forma experimental las magnitudes de fuerzas generadas al contacto de la herramienta con la zona de corte (en este caso habilitado para medir en los ejes X, Z).



**Figura 4:** Esquema de trabajo para la adquisición de las fuerzas de corte

La señal eléctrica amplificada es generada por el transductor de fuerza modelo 9121, suministrado por Kistler®, que a su vez es filtrada por medio de un amplificador de carga modelo 2647A, de la marca Brüel & Kjær®, para cada eje, con rango de frecuencia de 0,17 a 50 kHz. Esta señal es acondicionada mediante un módulo con tarjeta de adquisición de datos LAN-XI 3050A60, basado en tecnología Dyn-X, con un convertidor analógico de 24 bits de resolución y capaz de realizar un muestreo de datos hasta 51,2 kHz, donde a su vez la señal es analizada a través del software PULSE LabShop®, de la marca Brüel & Kjær®. Dicho módulo fue adaptado a un ordenador. Posteriormente, fue necesario determinar el valor de la frecuencia de muestreo, que para este estudio es de 800 Hz, equivalente a 1/5 de la frecuencia natural del dinamómetro.

Identificando los ejes de trabajo, tal como se muestra en el esquema anterior, se observa que a la fuerza radial al corte no se verá afectada. Por consiguiente, este estudio se centra en evaluar a la fuerza de corte  $F_c$ , ubicada de forma tangencial al eje de corte. Por último, la fuerza de avance  $F_f$  ubicada de forma axial y paralela a  $f$ . Ambas fuerzas resultantes se adquirieron bajo diversos valores de  $f$  en relación con  $V_c$ . Sin embargo, el diseño del corte requiere que  $f$  sea fijo, es decir, que la fuerza para vencer la resistencia del material dependerá del impacto inicial durante el primer giro o revolución de corte.

El análisis de la  $F_c$  permite conocer el esfuerzo requerido para realizar el corte así como sus posibles efectos en la herramienta durante los primeros instantes del mecanizado, mientras que el análisis de  $F_f$  permite conocer el comportamiento inicial de la fuerza de rozamiento de la herramienta con respecto a la pieza de trabajo.

En base a ello se generó un método de trabajo que permitiese extraer los datos necesarios para su evaluación. El intervalo de tiempo en la que fue empleada la herramienta de corte equivale a los 10 ensayos estipulados para cada escenario de corte, teniendo por tanto las mismas condiciones de corte  $V_c$  y  $f$ .

Por otro lado, para evaluar los aspectos físicos de la viruta como de la herramienta de corte, se empleó la técnica de Microscopía Óptica Estereoscópica (SOM, Stereoscopic Optical Microscopy), mediante un microscopio estereoscópico modelo Nikon Epiphot 280 serie 460774, con un rango de 1.5X - 400X, con cámara Kappa ImageJ Base modelo CF11 DSP, tarjeta PCI SC, con fuente emisora de luz Intralux 400 marca Volpi. La captura de imagen y las mediciones se realizaron haciendo uso del software OmniMet de Buehler, con la plataforma comercial ImageJ destinada para la medición de los aspectos que caracterizan cada variable.

### 3. Resultados

Como paso previo al análisis es necesario procesar los datos adquiridos de forma experimental. En este caso, mediante una evaluación exhaustiva de los aspectos físicos de la viruta (forma), y del posible desgaste en la herramienta de corte. Ambos resultados serán, relacionados con la tendencia adquiridas en tiempo real de las fuerzas de corte, posibilitando la caracterización del comportamiento de la aleación Ti6Al4V en función de los parámetros de corte  $V_c$  y  $f$ . Para el análisis y clasificación de los datos, se emplea el programa estadístico informático de libre distribución.

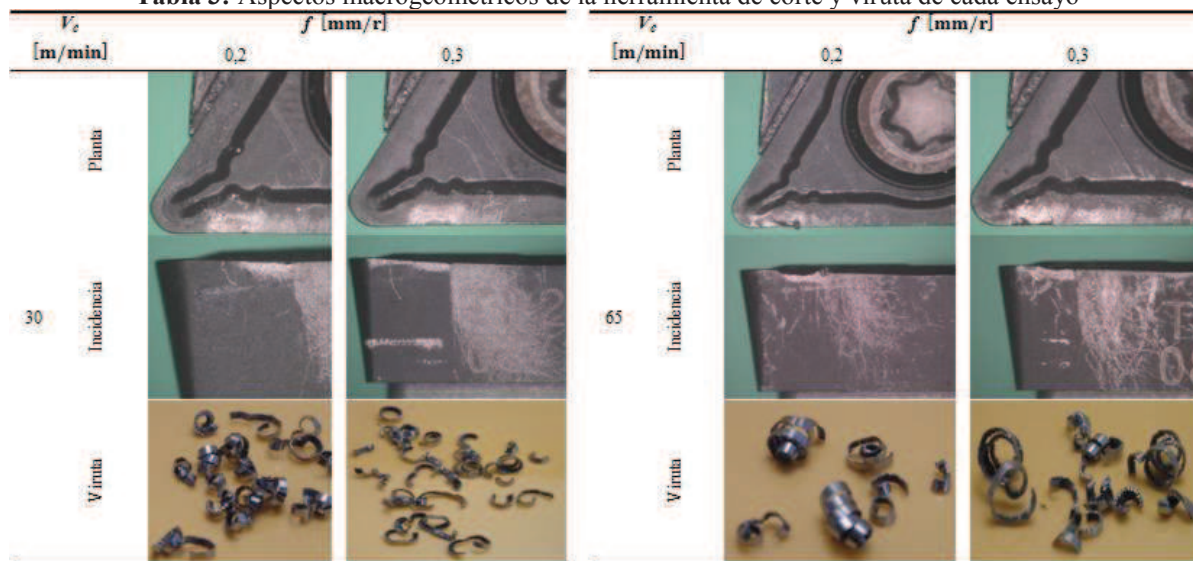
#### 3.1. Evaluación de aspectos macrogeométricos de la herramienta de corte y viruta

En este apartado se pretenden caracterizar las posibles alteraciones geométricas en el filo de la herramienta sufridas por el proceso de corte, así como en la geometría de la viruta, considerando los criterios establecidos en la norma ISO 3685:1993 [9]. Con este fin se realizó un análisis comparativo con investigaciones ligadas a esta aleación, en relación a los parámetros de tecnológicos para un determinado tipo de corte, relacionados ambos con la morfología de la viruta [10-12].

En la Tabla 3 se incluyen imágenes de la herramienta y de la viruta de la aleación Ti6Al4V. Obsérvese la existencia de fragmentos de material en la cara de desprendimiento de la herramienta al incrementar  $f$ , lo que indica un aumento del desgaste por adhesión secundaria [8].

Por otro lado, la morfología de la viruta también se encuentra influida por  $f$ . En efecto, rangos elevados supone un aumento del espesor de la viruta que, al producir la deformación plástica, conduce a un aumento de la resistencia del material y, por consiguiente, un incremento de temperatura y un aumento en sus fuerzas de corte, pudiendo ocasionar inestabilidades durante el mecanizado. Mientras tanto, el aspecto físico de la viruta para ambos ensayos es de tipo diente de sierra fragmentada, debido a la geometría de corte estipulada para este estudio.

**Tabla 3:** Aspectos macrogeométricos de la herramienta de corte y viruta de cada ensayo



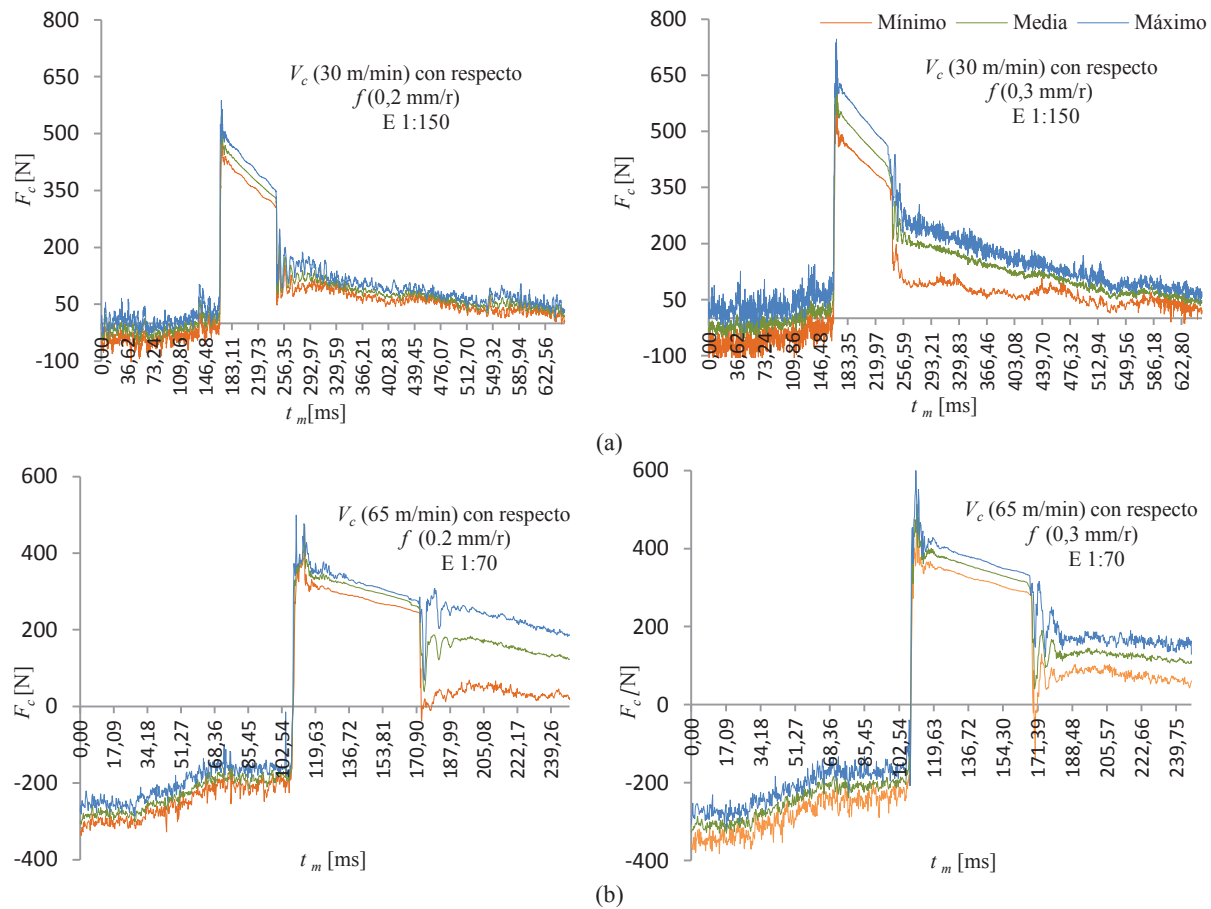
#### 3.2. Evaluación de fuerzas emitidas durante el mecanizado

La evolución temporal de las fuerzas ejercidas en la primera etapa del mecanizado está determinada por la señal emitida correspondiente a la fuerza capturada por el impacto inicial de la pieza sobre el filo cortante de la herramienta.

Donde se logra identificar una variación de las fuerzas respecto al tiempo del mecanizado, bajo diversos escenarios de corte:  $V_c$  de 30 y 65 m/min y  $f$  con valor de 0,2 y 0,3 mm/r.

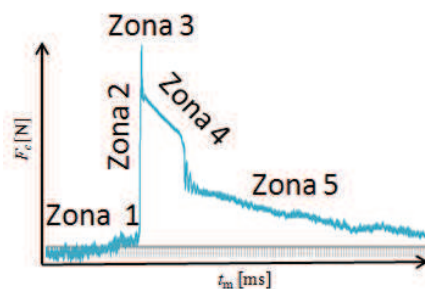
Los resultados obtenidos para  $F_c$  y  $F_f$  expresada en N y estarán representados por el promedio aritmético, así como también el valor mínimo y máximo de las nubes de datos, dichos valores permiten conocer la tendencia general de las fuerzas en función del tiempo de mecanizado bajo distintos rangos de  $f$ . Al comparar los resultados, se identifica una tendencia similar de  $F_c$  para ambos valores de  $V_c$  con respecto a  $f$ , debido al efecto cortante en los primeros instantes del mecanizado, creando una ligera fluctuación hasta llegar al punto máximo

de corte y posteriormente se estabiliza su valor central (permaneciendo constante) y finalmente disminuye de forma paulatina hasta finalizar el corte, tal como se observa en Figura 5 (a) y (b).



**Figura 5:** Evolución de  $F_c$  a distintos rangos de corte en función de  $f$ ; (a)  $V_c$  30 m/min y (b)  $V_c$  65 m/min

Estas figuras permiten identificar que a medida de que aumenta  $f$  a una velocidad constante, la fuerza asociada crece notablemente debido al incremento de espesor de la viruta obtenida. Sin embargo, para proceder con su análisis, es necesario identificar la ventana de estudio sobre la señal recibida de cada ensayo, representado en la Figura 6. A fin de identificar la evolución de la fuerzas de corte, fue necesario seccionar la señal en función del tiempo de mecanizado, bajo la condiciones estipuladas por cada conjunto de ensayos.

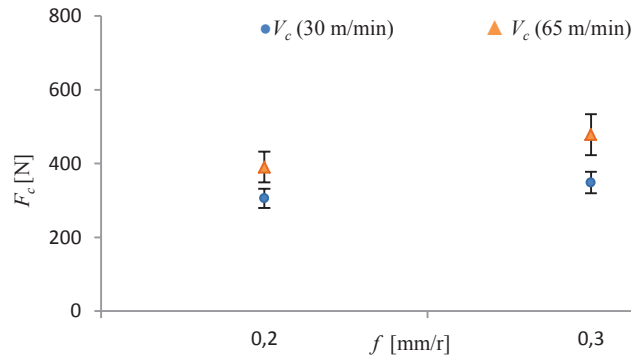


**Figura 6:** Ventana de estudio para el análisis de  $F_c$

En la Figura 6 se han marcado 5 zonas. La zona 1 es considerada como el tiempo que recorre la pieza dentro de la sección establecida como desahogo  $t_d$ ; corresponde a los primeros instantes de corte (tiempos transitorios); la zona 2 representa el intervalo de tiempo  $t_2$  que muestra los primeros cambios significativos de  $F_c$ , hasta llegar al punto máximo; la zona 3 se corresponde con la relajación de las fuerzas transitorias a su estado pseudo-estable  $t_3$ ; la zona 4 acota el intervalo de fuerza pseudo-estable hasta llegar unos instantes antes de finalizar el corte,  $t_4$ ; finalmente, la zona 5 representa la disminución del contacto herramienta-pieza y los últimos momentos del mecanizado  $t_5$ . Por tanto, el tiempo de mecanizado  $t_m$  está representado por la suma de los tiempos consumidos en estas cinco zonas. En este trabajo se ha analizado la zona 4 (donde se elimina el efecto de la entrada y salida de la herramienta de corte), mediante el valor medio global de los ensayos realizados en dicha zona.

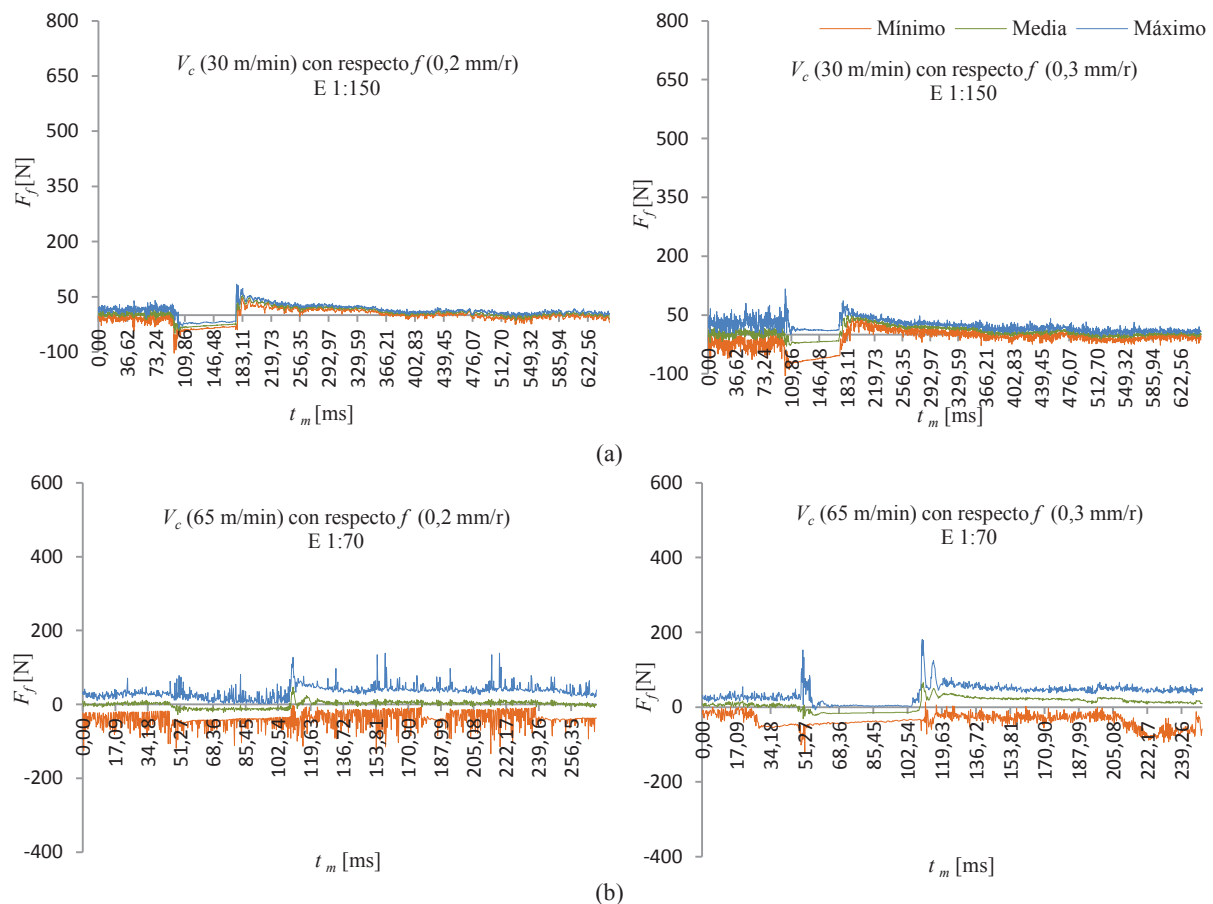


En la Figura 7 se incluyen los valores promedios de  $F_c$  en dicha zona para los valores de los parámetros empleados. Como puede observarse, para  $V_c$  de 30 m/min el valor promedio de  $F_c$  corresponde a 390 N con respecto a  $f$  de 0,2 mm/r; mientras que para  $f$  de 0,3 mm/r se muestra un incremento en su fuerza de un 18 % equivalente a 478 N. En cambio, para  $V_c$  de 65 m/min a un  $f$  de 0,2 mm/r la  $F_c$  es de 306 N; mientras que para  $f$  de 0,3 mm/r la  $F_c$  incrementa un 12 % equivalente a 349 N. Es decir, al incrementar  $f$  de forma progresiva, para ambos rangos de  $V_c$ , se requiere un mayor esfuerzo cortante para remover el material, influenciado por el espesor de la viruta. En otra perspectiva, evaluando la tendencia de las  $F_c$  con respecto a  $V_c$ , se observa una disminución en la magnitud de  $F_c$  con respecto al incremento de  $V_c$ , debido a una menor potencia de corte.



**Figura 7:** Tendencia de la  $F_c$  con respecto a distintos valores de  $V_c$  en función de  $f$

Finalmente, analizando la fuerza en eje axial,  $F_f$ , su tendencia aproximada corresponde a un 10% respecto al valor promedio de  $F_c$ , lo cual manifiesta que la pieza ejerce mayor presión en la herramienta durante el impacto y  $F_f$  solo se ve afectada por la fricción causada por el roce de la viruta en la cara de incidencia de la herramienta.



**Figura 8:** Evolución de  $F_f$  a distintos rangos de corte en función de  $f$ ; (a)  $V_c$  30 m/min y (b)  $V_c$  65 m/min

## 4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado una propuesta metodológica para la caracterización de las fuerzas de corte en el proceso de cilindrado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V), teniendo en cuenta su relación con parámetros tecnológicos asociados al proceso. Para ello, se han identificado y descrito las distintas etapas de la metodología, así como los recursos materiales e instrumentales empleados, aplicando diversas técnicas de monitorización que permiten controlar el seguimiento de las fuerzas de corte, aspectos geométricos de la viruta y el desgaste de la herramienta.

Este estudio ha demostrado ser un método alternativo que enfatiza el comportamiento transitorio de las fuerzas de corte durante los primeros instantes del mecanizado, permitiendo identificar aquellas variables que pueden afectar de forma significativa la estabilidad del proceso. Por otro lado, gracias a los datos obtenidos, ha sido posible considerar, como líneas complementarias, la evaluación macrogeométrica de la viruta y el desgaste de la herramienta en relación con las fuerzas de corte. Se ha identificado la morfología de la viruta, para ambos valores de  $V_c$ , siendo ésta de tipo diente de sierra fragmentada, afectada por la geometría de corte empleada para este estudio. Sin embargo, a medida que incrementa  $f$ , el espesor de la viruta aumenta de forma considerada y está relacionada con el crecimiento de fuerzas de corte requerida para remover dicha viruta.

Con referencia a los aspectos físicos encontrados en la herramienta de corte, se ha identificado un desgaste prematuro en el filo de corte, tanto en la cara de incidencia como de desprendimiento, ambos relacionados con el incremento de  $V_c$  y  $f$ . Las evidencias obtenidas se encuentran asociadas con la reactividad química que presenta el mecanizado de aleaciones con base titanio, es decir, su baja conductividad térmica y su elevado calor específico generan un incremento acelerado de su desgaste, que ha sido posible identificar en los primeros instantes del corte. Finalmente, en lo que respecta a las fuerza de corte, se identifica que a bajos valores de  $V_c$ , provoca un incremento de  $F_c$  y  $F_f$ ; en cambio sus valores disminuyen al aumentar  $V_c$ . Visto desde la perspectiva de  $f$ , el valor de sus fuerzas aumenta a medida que se incrementa  $f$ . El resultado de fuerzas tiene una relación con los aspectos físicos encontrados tanto en la herramienta como en la viruta.

## 5. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de Málaga, Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech, por el soporte prestado en el desarrollo de este trabajo. Paralelamente, este trabajo ha sido cofinanciado por el Ministerio de Economía y Competitividad, Proyecto DPI2015-71448-R.

## 6. Referencias

- [1] R. Materna, R. E. Mansfield, R. O. Walton. Aerospace Industry Report. 978-0-9881837-2-9.(2015).
- [2] P. J. Arrazola, A. Garay, L. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, F. Le Maître. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). Journal of Materials Processing Technology,209,(2009).2223-2230.
- [3] E. O. Ezugwu, Z. M. Wang. Titanium alloys and their machinability—a review. Journal of Materials Processing Technology,68,(1997).262-274.
- [4] J. P. Immarigeon, R. T. Holt, et al. Lightweight materials for aircraft applications. Materials Characterization,35,(1995).41-67.
- [5] E. O. Ezugwu. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture,45,(2005).1353-1367.
- [6] F. Nabhani. Machining of aerospace titanium alloys. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,17,(2001).99-106.
- [7] F. J. Trujillo Vilches. Análisis paramétrico del mecanizado en seco de la aleación UNS A97075. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, Málaga, España, (2013). ISBN:978-84-9747-776-5.
- [8] M. Batista Ponce. Características de los mecanismos de adhesión secundaria y su influencia en el desgaste de herramientas de corte. Aplicación al mecanizado en aleaciones ligeras. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, Cádiz, España, (2013).
- [9] ISO 3685: Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools. Genève, Switzerland,(1993).
- [10] A. Molinari, R. Cheriguene, H. Miguelez. Contact variables and thermal effects at the tool–chip interface in orthogonal cutting. International Journal of Solids and Structures,49,(2012).3774-3796.
- [11] S. Sun, M. Brandt, M. S. Dargusch. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture,49,(2009).561-568.
- [12] A. Daymi, M. Boujelbene, S. B. Salem, B. H. Sassi, S. Torbaty. Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces. Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering,1,(2009).77-83.





